



9  
29

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES "CUAUTITLAN"**

**"DEGRADACION DEL POLIETILENO"**

**FALLA DE ORIGEN**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A

**GARCIA ESPINOSA MARTIN ARNOLDO**

**ASESOR: I. Q. ARIEL SAMUEL BAUTISTA SALGADO**

**CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.**

**1989.**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## "DEGRADACION DEL POLIETILENO"

### INDICE

- Objetivos	1
- Introducción	1
<b>Capítulo I.- Origen de los Desechos Polietilénicos</b>	
I.1 Definiciones.	3
I.2 Desperdicios Polietilénicos Industriales.	5
I.3 Desperdicios Polietilénicos Humanos.	7
I.4 Recolección por Pepena.	
<b>Capítulo II.- Generalidades del Polietileno</b>	
II.1 Historia del Polietileno	10
II.2 Estructura	11
II.3 Tipos y Métodos de Fabricación	12
II.4 Características.	14
II.5 Usos	17
II.6 Datos Estadísticos Económicos.	18
<b>Capítulo III.- Separación del Polietileno</b>	
III.1 Lavado y Reducción de Tamaño	23
III.2 Separación.	24
III.2.1 Separación por Arrastre de aire	24
III.2.2 Separación por Aplicación de calor.	25
.1 Método del Cilindro Caliente.	25
.2 Método de Reducción por Calor	27
III.2.3 Separación Electrodinámica.	28
III.2.4 Separación por el Método de Flotación/Sedimentación	29

<b>Capítulo IV.- Degradación del Polietileno</b>	
IV.1 Degradación Termooxidativa . . . . .	33
.1 Rompimiento de Cadenas . . . . .	35
IV.2 Fotodegradación. . . . .	37
.1 Formación de Radicales Libres . . . . .	39
.2 Entrecruzamiento . . . . .	40
IV.3 Estabilización del Polietileno . . . . .	41
.1 Antioxidante . . . . .	41
.2 Fotoestabilizadores . . . . .	43
<b>Capítulo V.- Reciclado del Polietileno</b>	
V.1 Moldeo por Extrusión . . . . .	45
V.2 Moldeo por Inyección . . . . .	47
V.3 Pirólisis . . . . .	49
.1 Polietileno como Fuente de Productos Químicos . . . . .	50
.2 Polietileno como Fuente de Energía . . . . .	50
<b>Capítulo VI.- Disposición del Polietileno sin Reciclar</b>	
VI.1 Incineración . . . . .	55
VI.2 Relleno Sanitario . . . . .	57
<b>CONCLUSIONES . . . . .</b>	<b>60</b>
<b>APENDICE: Definiciones Básicas Acerca de los Polímeros . . . . .</b>	<b>64</b>
<b>BIBLIOGRAFIA . . . . .</b>	<b>72</b>

## OBJETIVOS

- Se identificará el problema que causan los desperdicios polietilénicos que se encuentran en la basura y que afectan el medio ambiente.

- Se plantearán algunas soluciones para resolver este problema.

## INTRODUCCION

Uno de los mayores problemas, con los que cuenta en la actualidad el ser humano, es el de la contaminación ambiental originada por los desechos humanos, comúnmente llamados "basura", dentro de la cual, los plásticos forman parte, mas aún, que se ha incrementado su uso y desarrollado nuevas aplicaciones, llegando a substituir a materiales que convencionalmente se venían utilizando, tales como el vidrio, los metales, la madera, etc.

El porcentaje en peso de los plásticos que componen la basura es pequeño, y todavía así, la cantidad de ellos en toneladas es considerable.

Los desperdicios plásticos han contribuido a contaminar junto con otros materiales, gravemente el medio ambiente.

Lo anterior se ha convertido en un problema muy serio, debido a que los plásticos, en nuestro caso muy particular el POLIETILENO, no son materiales que se puedan biodegradar, es decir, son materiales que al ser desechados o convertidos en basura, no pueden ser transformados por los microorganismos que se encuentran en la naturaleza, en sustancias inofensivas que forman parte de la misma; ya que estos microorganismos prefieren atacar otras formas de materia.

Por esto y, por la necesidad de alternativas para cubrir la escasez y el incremento del valor constante de la materia prima, los investigadores buscan nuevas formas de reutilizar el plástico desechado por el consumo humano y que día tras día se viene almacenando en los sitios destinados para esto.

La presente tesis, pretende dar ha conocer algunas soluciones al problema que representa para la naturaleza y el ser humano, la contaminación con estos desperdicios plásticos, orientandonos específicamente hacia el plástico llamado Polietileno (PE).

## CAPITULO I

### ORIGEN DE LOS DESECHOS POLIETILENICOS

#### I.1 Definiciones

La contaminación ambiental son todos los medios extraños que se infiltran en el medio ambiente, causando en él mal olor, ensuciándolo, manchándolo o viciándolo y que resulte nocivo a la vida, la salud, la flora y a la fauna y que degraden la calidad del aire, del agua, suelo o de los bienes y recursos en general.<sup>4</sup>

Los desperdicios polietilénicos, al igual que todos los productos de desecho que emanan de la actividad del hombre, afectan al medio ambiente y directamente al suelo.

Se consideran desperdicios plásticos, cuando estos materiales no se producen en cantidades suficientes para ser reprocessados y, además no se obtienen con ellos un valor económico redituable. El origen de los residuos o desperdicios es muy heterogéneo y difícil de sistematizar.

Laguna y Arganza<sup>6</sup>, clasifican los desperdicios plásticos - por su lugar de producción; por su naturaleza y por su procedencia u origen.

Por el lugar de producción se clasifican en: a) Desperdicios plásticos industriales; b) Mezcla de desperdicios y c) Desperdicios posconsumidos.

a) Desperdicios Plásticos Industriales.- Son los desechos - plásticos generados por varios sectores industriales, como resultado de operaciones de conversión de plásticos, donde el material

desechada se encuentra de tal forma que puede ser reintroducida - al ciclo de manufactura original.

b) Mezclas de desperdicios plásticos en los que se omite su composición y no están muy contaminados.- Los desechos son generados en las plantas procesadoras, de manera especial por la industria eléctrica, automotriz y de accesorios y herramientas. Estos desechos se recolectan y se limpian con facilidad. El problema que se presenta, es por la presencia de diferentes tipos de polímeros que dificulta el reprocesamiento, debido a la falta de compatibilidad de la mayoría de los plásticos de la mezcla.

c) Desperdicios plásticos postconsumidos.- Son los desechos generados por el consumidor; presentan los mayores problemas de recolección, separación de los componentes no plásticos y eliminación de los componentes, debido a que se encuentran en la basura.

De acuerdo a su naturaleza, los desperdicios plásticos pueden ser subclasificados en no recuperables y recuperables.

- Los desperdicios plásticos no recuperables son aquellos que no pueden ser reciclados dentro de las condiciones tecnológicas existentes. Por lo general de plásticos termofijos.

- Los desperdicios plásticos recuperables son aquellos que si pueden ser reprocesados y volver a obtener de ellos productos con buena aceptación comercial. Proviene generalmente de plásticos termoplásticos.

Por su preponderancia los desechos plásticos son de dos tipos principales: los desperdicios plásticos industriales y los desperdicios plásticos urbanos, que a continuación se tratan con más detalle.

## I.2 Desperdicios Plásticos Industriales

El polietileno, como plástico reprocesable sigue un ciclo - muy marcado, desde su producción como resina virgen hasta llegar al reprocesamiento de los desperdicios que de él se obtienen, tal como lo muestra la figura 1.1.<sup>1</sup>

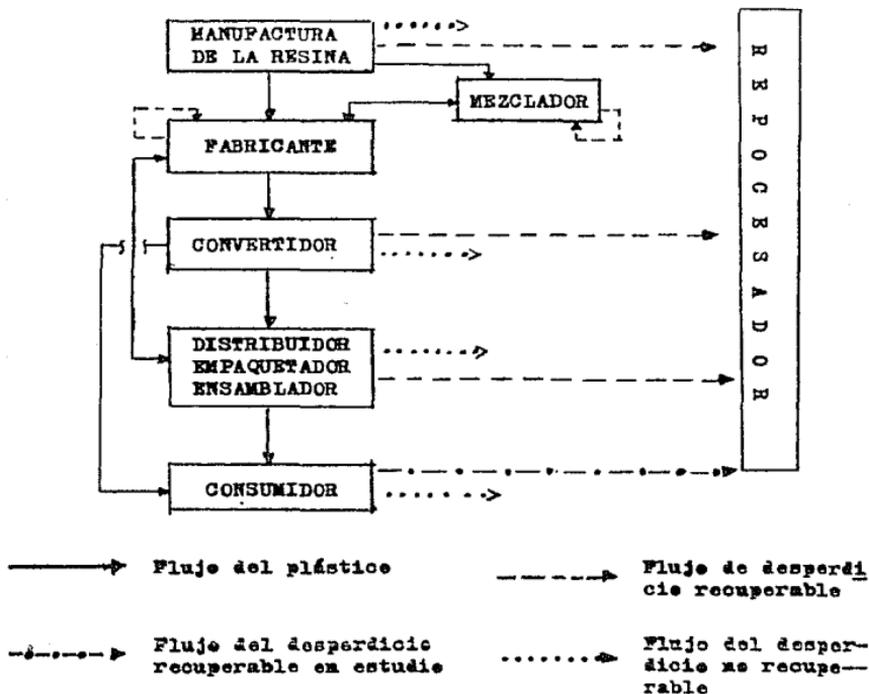


Fig. 1.1 CICLO DE LOS PRODUCTOS PLASTICOS POLIETILENICOS.

La resina del polietileno obtenida en la industria petroquímica primaria es suministrada al fabricante y al convertidor o mezclador, como producto de "primera", es decir, material que reúne todas las normas de control de calidad, tales como color, densidad, sin granules oxidados, etc.<sup>30</sup>.

Dentro del proceso de obtención de la resina se obtienen desperdicios e materiales de "segunda", que por no reunir con alguna de las normas de control de calidad, se consideran como tales, a pesar de contar la mayoría de las veces con las mismas propiedades que la de los materiales de "primera". Estos desperdicios son generados por el proceso de polimerización, número de etapas del proceso, paros y arranque del equipo, manejo y almacenamiento del material. En este rengón, el plástico que menos desperdicios genera es el polietileno 7.

El fabricante, genera sus desperdicios por piezas defectuosas y sobrantes, además de los ya mencionados. Vende sus productos más sus desperdicios, que pueden reciclarse dentro de la misma planta, a empresas convertidoras, que les utilizan para la fabricación de armados, empaques, etc.

Las empresas convertidoras compran productos plásticos semi-terminados - películas plásticas - y las transforman en productos finales. Los plásticos de desecho recuperables pueden ser re-procesados e vendidos a través al fabricante.

El empaquetador, ensamblador o distribuidor, recibe los productos finales para posteriormente venderse al consumidor, aunque no siempre en forma directa, y muy poco de su desperdicio se re-procesa.

El es el que pone fin al ciclo, ya que ha generado solo material no recuperable, pero por la problemática ya explicada se hace necesario explicar y estudiar su potencialidad de reprecésamiento y que trataremos más adelante.

El reprecésador genera poco desperdicio polietilénico, durante el purgado y para del equipo<sup>1</sup>.

Como se puede leer, todo el desperdicio polietilénico, o mejor dicho, gran parte de este desperdicio puede ser reprecésable, por la propiedad que tiene el polietileno de ser un termoplástico.

### I.3 Desperdicios Polietilénicos Humanos: Tiraderos a Cielo Abierto

Como se vio previamente, los productos plásticos finales llegan al consumidor para cubrir sus necesidades. Este sin una verdadera educación y sobre todo orientación al problema de la disposición de los desechos, utiliza el producto y lo desecha, originando con esto, una gran acumulación de estos desperdicios, formando lo que se llama basura o desechos humanos urbanos.

La basura así producida, se dispone en tiraderos a cielo abierto, que es el método más sencillo para eliminar los desechos plásticos y sólidos y, es el sistema más generalizado de disposición de la basura en el país. Consiste en localizar una área determinada de terreno, en donde se depositen los desperdicios, sobre todo los plásticos de película, que son los de mayor auge en la actualidad, los cuales permanecen en la superficie de los promenterios y en donde se originan prácticamente los problemas de la contaminación ambiental, ya que el viento las dispersa en todas las direcciones, presentando muchos problemas, por ser materiales no biodegradables<sup>4</sup>.

Algunos de los problemas que se presentan, por la presencia

de los materiales plásticos en la basura son: tapenamientos en conductos de agua y alcantarillas, mala filtración del agua en terrenos agrícolas; producen un aspecto desagradable y sucio en los sitios donde permanezca, impiden que los prementerios de basura se irriguen adecuadamente originando una descomposición lenta y por consiguiente, un aumento constante de basura<sup>3</sup>.

En la actualidad, los plásticos solo constituyen del 0-5% de la composición del total de la basura. Países industrializados, con grandes volúmenes en producción de desechos como los Estados Unidos de América, Alemania y Japón, solo tienen una composición del 2, 3 y 5% respectivamente del plástico en la basura. De este porcentaje, las poliolefinas -polietileno alta y baja densidad y polipropileno- constituyen el 70% de todos los plásticos en la basura. Pero como el uso del plástico va en aumento, se calcula que para el año 2000 el porcentaje aumentará del 10-15%<sup>1</sup>.

De acuerdo con estadísticas, en la ciudad de México los desperdicios plásticos representan únicamente el 0.4% de la cantidad total de los desechos recolectados anualmente. De este porcentaje, alrededor del 55% corresponde al polietileno (22% al polietileno alta densidad y 33% al de baja densidad)<sup>7</sup>.

Otros métodos de disposición de la basura son como relleno sanitario y por la incineración, pero se trataban en otros capítulos.

#### I.4 Recolección por Papeza

La papeza es el procedimiento por el cual se evita la acumulación de los desechos plásticos y de los demás desechos útiles que se encuentran en la basura, llevada a cabo por recolección humana o en forma mecánica.

La recolección humana es mínima y puede considerarse a este método, como un recurso de subsistencia para gentes de muy bajos recursos económicos y desgraciadamente, no como un método de recuperación de desechos plásticos propiamente dicho. Dada a la poca eficiencia del mismo, es muy poco utilizado en la recolección de los desperdicios plásticos.

En cambio la separación mecánica es más utilizada, o más bien dicho, se siguen haciendo experimentos con ella, por lo que en el capítulo III, se hablará con más detalle de ésta.

## CAPITULO II

### GENERALIDADES DEL POLIETILENO

#### II.1 Historia del Polietileno

- En 1898, Von Pecman observa pequeñas partículas de sustancias blancas floculentas, que pueden ser cristalizadas de cloroformo. Aunque la cantidad obtenida es insuficiente para estudiarse.

- Dos años después, Hamberger y Tschimer obtienen una cantidad apreciable de este material, pudiendo determinar lo siguiente: fórmula general  $(CH_2)_n$ ; punto de fusión,  $128^{\circ}C$ . El material es llamado "polietileno".

- El año de 1933, es importante para el material, ya que los doctores Eric W. Fawcett y Reginald O. Gibson de la Imperial Chemical Industries (ICI) de Inglaterra, patentan el proceso de alta presión.

- En 1936, se proyecta una planta piloto y el polietileno es llamado Polietileno de Alta Presión, hoy conocido como Polietileno de Baja Densidad.

- Se produce la primera tonelada, en la planta piloto, en 1938.

- Un año después se produce comercialmente.

- En 1940, la producción llega a 100 toneladas y al finalizar la segunda gran guerra, es de 1500 ton.

- Es tal la demanda del producto, que en 1952, una corte federal determina que la ICI debe modificar su patente, para permitir que otras industrias lo fabriquen.

- En la década de los 50s se presentan una serie de patentes en la polimerización del polietileno, teniendo todas en común, el uso de catalizadores sólidos, la operación a bajas presiones y la producción de un polímero más duro y fuerte que el de la ICI. Al material producido se lo llama Polietileno Lineal -de alta densidad- y las tecnologías principales corresponden a: Phillips, Ziegler y la Standard Oil. La diferencia entre ellas es básicamente el tipo de catalizador empleado 9, 10, 40.

## II.2 Estructura del Polietileno

### II.2.1 Estructura Química.

La fórmula empírica que le corresponde al polietileno, de acuerdo con los análisis -C, 85.7%; H, 14.3%- realizadas es la de  $(CH_2)_n$ , resultante de la polimerización por adición del etileno. La molécula no es una cadena sencilla de grupos metilo. La del polietileno lineal, los enlaces carbono-carbono son covalentes, - mientras que en la cadena ramificada difiere de la de un alcano - de cadena recta por grupos efémeros de por lo menos tres tipos:  $-RCH=CH_2$ ,  $RCH=CH-R$  y  $RR_2C=CH_2$ , siendo el último tipo el más abundante, la estructura puede contener también otros grupos químicos derivados del catalizador usado en su fabricación o de impurezas en el etileno, pero representan menos del 0.1% en peso del polímero. Por otro lado, la condición ramificada de la cadena influye profundamente en las propiedades físicas del sólido 10,40.

### II.2.2 Estructura Física

El carácter más importante de la estructura física del polietileno es la cristalinidad parcial del sólido. El polietileno tiene una estructura parcialmente cristalina, parcialmente amorfa y - muestra un cambio gradual a medida que aumenta la temperatura, - hasta el estado completamente amorfo fundido.

La célula unitaria es ortorrómbica y las moléculas están completamente extendidas en planos paralelos. El esqueleto molecular forma zig-zag de átomos de carbono, la distancia interatómica es de aproximadamente de  $1.5\text{\AA}$  y el ángulo entre las ligaduras carbono-carbono es un poco mayor que el ángulo tetraédrico,  $109.5^\circ$ . Los estudios de los modos de cristalización del polietileno desde su estado fundido muestran que, la cristalización comienza en puntos distribuidos al azar en la masa del material y prosiguen radialmente hacia fuera con una rapidez que depende de la temperatura a la cual se produce la cristalización 10, 40.

### II.3 Tipos de Polietileno y Métodos de Fabricación

El polietileno es categorizado de acuerdo a su densidad, debido a que esta característica está en función directa a la cristalinidad y además, de que las propiedades mecánicas, eléctricas y ópticas varían con la misma y esta a su vez depende con la estructura molecular del polímero, por lo que el polietileno se clasifica en tres tipos 11, 30.

TIPO	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
Baja densidad	0.910 a 0.925
Media densidad	0.926 a 0.944
Alta densidad	0.945 a 0.970

Por la influencia que tiene el peso molecular sobre las características generales del producto, se hace una subdivisión:

Polietileno de bajo peso molecular: menor de 12000

Polietileno de alto peso molecular: mayor de 12000.

El polietileno se produce por cuatro métodos: proceso de alta presión; proceso Ziegler; proceso Phillips y proceso de la S---tandard Oil. 1, 12, 30.

#### a) Proceso de Alta Presión

La polimerización se lleva a cabo a presiones de 1000 a 3000 atm., acompañadas con temperaturas que van de 80 a 300°C. La reacción va vía radicales libres y debido a que la reacción es altamente exotérmica, se requiere que la superficie de un volumen determinado del reactante sea enfriado. Generalmente, el porcentaje que se convierte de gas alimentado (etileno) a polímero es del 10 al 30%. El gas sin reaccionar es separado del polímero formado. El proceso es utilizado para obtener polietileno de baja densidad y de bajo peso molecular.

#### b) Proceso Ziegler

La polimerización se lleva a cabo a temperaturas menores de 100°C y bajas presiones. Utiliza un catalizador de óxido metálico y se prepara primero un complejo catalítico y se alimenta al reactor o se mezcla por separado. En la etapa final del proceso el catalizador es separado del polímero formado. Este proceso se utiliza para fabricar polietileno de media densidad.

#### c) Proceso Phillips

El etileno es disuelto en un hidrocarburo líquido y polimerizado con ayuda de un catalizador de óxido metálico como se parte a temperaturas de 130 a 160°C y presiones de 13 a 34 atm. Se obtiene con este proceso polietileno de alta densidad. El peso molecular del polietileno puede ser ajustado con cambios en la temperatura de reacción.

#### d) Proceso de la Standard Oil

Es similar al Phillips: los catalizadores deben activarse antes de entrar en contacto con la mezcla activa. En ambos se utiliza un catalizador de óxido metálico, pero la reacción se efectúa a temperaturas más altas: 230-270°C, y presiones menores, 40-80 atm. También se obtiene polietileno de alta densidad.

## II.4 Características del Polietileno

A continuación se describen las características generales, aunque no participen del total de ellas todos los tipos de polietileno. La expresión cuantitativa se aplica, según el caso, al tipo de polietileno que se trate, lo que indica que hay propiedades comunes de identificación y por supuesto, específicas 11, 30.

- Forma: sólido a temperatura ambiente.

- Color: blanco ceroso.

- Olor: inodoro.

- Sabor: insípido.

- Índice de fluidez: es el peso del polímero extruido en un cilindro estandarizado, durante 10 min. Por lo general, su valor se encuentra entre 0.3 y 45 g/10 min.

Peso molecular: varían de 1000 a 50,000.

- Estabilidad: es de los polímeros más estables e inertes, sin embargo puede ser afectado por sustancias oxidantes, originándose cambios en las propiedades, como pérdida de resistencia mecánica, reducción de peso molecular, desarrollo de olor y color.

- Resistencia a soluciones: es muy resistente a los ácidos diluidos, alcalis y soluciones salinas. Es atacado por ácidos fuertes como el nítrico; es vulnerable al permanganato de potasio y al peróxido de hidrógeno a temperaturas elevadas. A temperatura ambiente es bastante resistente al flúor y al ácido fluorhídrico. Es atacado solo en la superficie por el cloro, y a temperaturas elevadas los halógenos reaccionan por sustitución con el polímero, formando los ácidos correspondientes.

- Toxicidad: no es tóxico y es además biológicamente inerte.

- Solubilidad: los hidrocarburos alifáticos, aromáticos y clorados causan modificaciones en sus propiedades físicas, que se recuperan al evaporar el disolvente. Se los materiales no volátiles como vaselinas, grasas o aceites animales o vegetales causan daño permanente en el polietileno de baja densidad. A temperaturas mayores de 70°C, el polietileno alta densidad se disuelve en tolueno, xileno, decalina, tricloro etano, hidrocarburos clorados, tetralina, éter de petróleo, aguarrás, aceites lubricantes y parafinas. A 100°C, cualquier polietileno es totalmente miscible, en toda proporción, siendo el mejor disolvente, la decalina.

Es insoluble a cualquier temperatura en agua, etanol, acetona, ácido acético y disulfuro de carbono.

- Permeabilidad: A líquidos.- pobre en el caso de líquidos pesados orgánicos, aumenta cuando se trata de líquidos orgánicos no pesados; casi nula la permeabilidad al agua.

A gases.- baja permeabilidad al vapor de agua, gran permeabilidad a vapores orgánicos y gases.

- Resistencia ambiental: la acción del medio ambiente hace que el polietileno se degrade o agriete después de cierto tiempo de trabajo. Es más notorio si el polietileno, se encuentra en contacto directo con detergentes, disolventes o ácidos.

- Tenacidad: alta.

- Resistencia al impacto: buena. Los valores están comprendidos de 150 a 850 g., en película de 0.0038 cm de espesor para el polietileno de baja densidad y en el polietileno de alta densidad los valores van de 7 a 25 Kg-cm/cm.

- Flexibilidad: buena, aún a temperaturas muy bajas.

- Aislante eléctrico: excelente.

- Acabado: para fines de presentación, se puede afirmar que re tiene bien celerantes y pigmentos.

- Resistencia al rasgado: en película los resultados se repertan en sentido longitudinal y transversal en porcentaje, estando los valores en un rango de 600 a 1100.

- Módulo de rigidez: entre más alto sea su valor, más rígido es el polietileno. La rigidez aumenta con la densidad y en menor grado, con la disminución del índice de fluidez. Los valores están comprendidos entre 11,000 y 19,000 Kg/cm<sup>2</sup>.

- Elongación al punto de ruptura: se expresa como el porcentaje de dicho alargamiento de película o placa de polietileno en relación al largo original. Disminuye a medida que aumenta la densidad. Los valores van de 700 a 1,000 %.

- Punto de reblandecimiento: indica la resistencia de un artículo de plástico a la deformación, cuando se le aplica calor excesivo. El rango de valores es de 110 a 136°C (el del polietileno de alta densidad es de 122 a 130°C).

## II.5 Usos del Polietileno

De todos los plásticos, el polietileno, es tal vez el más versátil y el más usado. Este es, por la cantidad de artículos que son producidos a partir de él. A continuación se anota, por mencionar algunas, los usos que como producto terminado tienen.

- Película alta transparencia: utilizada para la producción de bolsas transparentes de diversos tamaños, bolsas impresas y pigmentadas, empaques de alimentos, de camisas, trajes, zapatos artículos de oficina, fundas de discos, etc.

- Película alta resistencia: se fabrican sacos para empaques de granos, fertilizantes, productos químicos, etc.

- Insulación de substratos; especialmente los envases de leche hecho de cartón con el interior protegido con una capa de polietileno.

- Película transparente y pigmentada para uso en agricultura: canales, drenajes, invernaderos, recubrimiento de frutales, etc.

- Recubrimiento de cables.

- Tuberías y mangueras.

- Artículos para construcción: paneles, perfiles, ciavillas, tuberías conduit y sanitaria.

- Partes industriales y automotrices.

- Envases de todo tipo y tamaño: frascos, botellas, garrafas, tambores, tiracos, etc.

- Limsa hogar: vasos, platos, palanganas, cubiertos, recipiente, saleros, etc.

- Monofilamentos para cordelería e industria textil.

- Juguetes, cajas de refrescos, etc.

## II.6 Datos Económicos Estadísticos

La producción de plásticos, tanto nacional como mundial, ha tenido un crecimiento constante al paso de los años, debido a la mayor demanda que tienen estos, mientras que en 1929, por ejemplo, se producían 85000 ton.; en 1980 se produjeron 58,728,000 ton., y para el año de 1995 se estima un crecimiento 128.3 millones de ton., calculadas en base al crecimiento anual de producción.

Los plásticos de mayor demanda y producción son: el polietileno, en sus tipos de baja y alta densidad; el cloruro de polivinilo; el poliestireno y el polipropileno. Ahora bien, la resina de mayor demanda en el mercado nacional es el polietileno de baja densidad.

Con respecto a las importaciones y exportaciones; a nivel nacional, el polietileno es solo producido por la empresa Petróleos Mexicanos (PEMEX), la cual es también, la única importadora.

Aunque se lea a contradicción, el polietileno es exportado por las siguientes empresas: Gulf Oil, City Services, Union Carbide y Dew Chemical.

A continuación, se muestran algunos datos económicos estadísticos del año de 1987, en toneladas y miles de pesos, del polietileno baja densidad (PEBD) y el polietileno alta densidad (PEAD).

### T O N E L A D A S

	PRODUCCION	IMPORTACION	EXPORTACION	CONSUMO APARENTE
PEBD	275,108	540.0	15,282.0	298,000
PEAD	75,992	840.0	9,597.0	131,500

### M I L E S D E P E S O S

	PRODUCCION	IMPORTACION	EXPORTACION	CONSUMO APARENTE
PEBD	-	1,779,420	18,661,350	-
PEAD	-	1,396,840 (18)	9,905,250	-

### CAPITULO III

#### SEPARACION DEL POLIETILENO DE LA BASURA URBANA

Por su diversa composición, la basura puede ser vista como - fuente potencial de polietileno de buen valor económico, a pesar de que en la actualidad es casi nulo su valor <sup>19</sup>.

Por la contaminación, la escasez y el alza continua del valor de las materias primas, se esta haciendo imperiosa la necesidad de volver a reprocessar los plásticos, para beneficio colectivo. Aunque la proporción de los desperdicios polietilénicos y plásticos en la basura es pequeña, la cantidad actual es de consideración, como se menciona anteriormente. De ahí que surge la necesidad de separar - los componentes de la misma, para su posterior refabricación y reutilización <sup>6</sup>.

La separación del polietileno de la basura, no es sencilla, so bre todo que se necesita una excelente separación, ya que, si se le gra separar todo el polietileno de los demás contaminantes, como - los demás plásticos, papel, metales, cartón, etc., que forman parte de la basura, se le puede reprocessar por los métodos convencionales de fabricación del mismo, como cuando éste es resina virgen. Pero - si se conservan, por ejemplo, los plásticos termofijo, entonces es muy difícil el reprocessamiento. Ahora bien, el reprocessamiento del polietileno con plásticos termoplásticos, dan productos con diferen tes propiedades a los obtenidos con resina virgen y que no son las deseadas <sup>2</sup>.

En este capítulo presentamos algunas técnicas de separación, - hasta obtener el producto en estudio, sino al 100%, si en condicio nes para su posterior reprocessamiento.

Esta separación la hemos dividido en dos etapas: la prepara- -

ción del material a separar y la separación propiamente dicha.

En la primera etapa, la preparación del material, se recibe a la mezcla de productos plásticos, junto con papel, metal en cables eléctricos, lodo, residuos orgánicos, etc. El tratamiento inicial que se le da es el del lavado con agua, para limpiar a los productos sólidos de lodo, residuos orgánicos, mugre, etc., seguida de una reducción de tamaño del material, el cual facilita la separación posterior, que es otra vez la de lavado, pero ahora con soluciones preparadas con este fin. En esta etapa se tiene como resultado una mezcla, que consiste de papel, metal y plásticos como el polietileno alta y baja densidad, cloruro de polivinilo, polipropileno y poliestireno principalmente, limpios y melidos, lista para ser separada (ver apartado de tesis III.1).

En la segunda etapa, la separación de la mezcla anterior se lleva a cabo con los siguientes métodos:

- Separación por arrastre de aire, en donde se utiliza un flujo de aire dentro de un clasificador, para separar la mezcla (apartado III.2.1).

- Separación por aplicación de calor, dividido en dos métodos, los cuales son: método del cilindro caliente y el método de reducción por calor. La separación se hace utilizando altas temperaturas (apartado III.2.2).

Los anteriores métodos son utilizados para separar el papel de los metales y plásticos presentes en la mezcla original, quedando por separar a los dos últimos y a los productos de papel remanentes.

La separación del metal, plásticos y productos remanentes de papel, se hace por el método Electrodinámico, que utiliza un cam-

pe magnético para separar a los materiales conductores, de los no conductores y de los no conductores.

Finalmente se tiene sólo la mezcla de los desperdicios plásticos, la cual se separa por el método de Flotación/Sedimentación aprovechando las diferentes densidades que tienen los mismos.

Todo el proceso de separación aquí presentado, se muestra en el diagrama de bloques de la figura 3.1.

Los polietilenes de alta y baja densidad separados, tienen un tratamiento posterior. De ellos se obtienen productos subsecuentes, utilizando el reprocesamiento, ya sea por el método de extrusión o el de inyección (apartados V.1 y V.2 respectivamente) o en el caso de que se quieran obtener químicos o utilizarlos como combustibles, la pirólisis (apartado V.3). Esto es en el caso de que se quieran obtener beneficios económicos; pero, si lo único que se requiere es disminuir su volumen, se recurre a los métodos de incineración (apartado VI.1) y al relleno sanitario (apartado VI.2). Todos estos métodos los trataremos en capítulos posteriores.

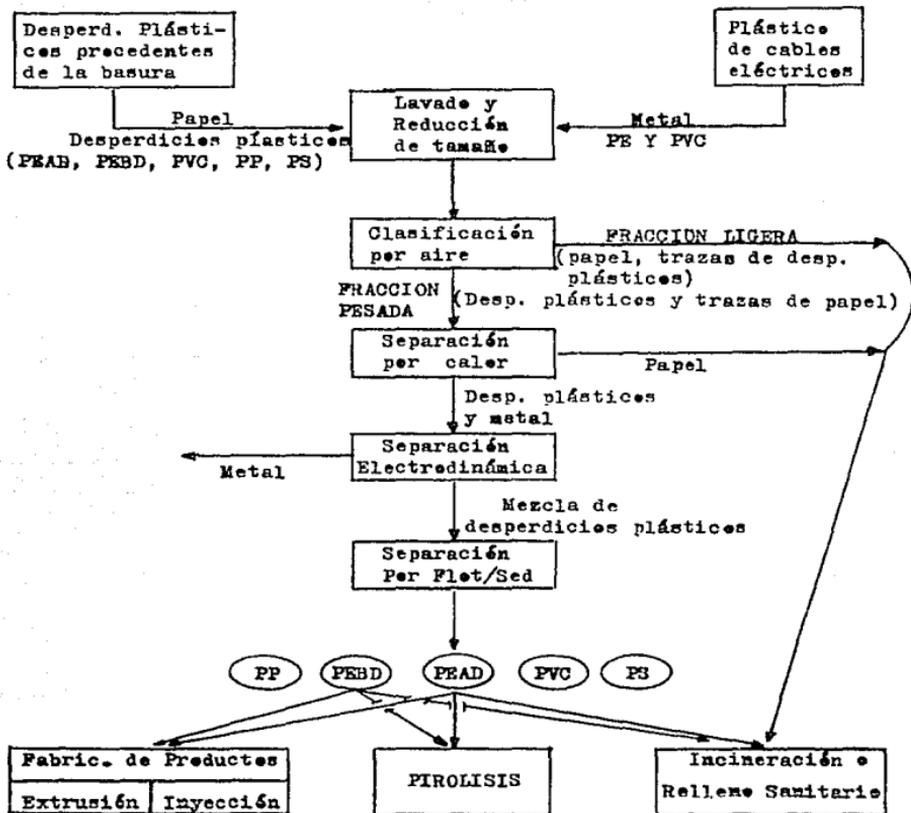


Fig 3.1 Diagrama de bloques del proceso de separación y de las alternativas de reproceso, y disposición de los desperdicios plásticos que se encuentran en la basura.

### III.1 Lavado y Reducción de Tamaño

Antes de empezar el tratamiento de separación de los desechos pelietilénicos que se encuentran en la basura, es necesario limpiarlos de todos los contaminantes que trae consigo, tales como: lodo, mugre, etiquetas, adhesivos y materiales residuales <sup>2</sup>.

Para liberar a los productos pelietilénicos y plásticos de letreros y etiquetas que traen consigo, la "US Bureau of Mines" ha realizado numerosas pruebas, empleando soluciones de lavado y métodos de agitación. Se utilizó agua caliente y fría, mezcla de soluciones acuosa y alcohol, acetona, benceno y soluciones de hidróxido de sodio, acompañadas con métodos de agitación y lavado con fricción.

Los productos con letreros y etiquetas, en este caso botellas, fueron molidos hasta un tamaño de partícula de aproximadamente, 0.5 plg., empleando un molino rotatorio de cuchillas.

El paso siguiente fue el lavado del material, para este se emplearon las soluciones antes mencionadas, y los mejores resultados se obtuvieron con las soluciones de hidróxido de sodio, 1 N, conteniendo 150 g de arena para un litro de solución, en una muestra de 1200 g del plástico en 600 ml de solución, acompañando a cada prueba con su respectiva agitación.

Cerca del 98% de las partículas quedaron limpias, después de una hora de lavado. En las pruebas de lavado con agua y la misma cantidad de arena, 150 g per litro de solución, se comprobó que el 96% de las partículas quedaron limpias, por lo tanto este último método de lavado es más conveniente, para su empleo industrial.

Posteriormente, el pelietileno fue separado de trozos de papel, polvo, películas, y espumas en un separador de aire, el cual explicaremos más adelante <sup>3, 5</sup>.

### III.2 Separación

#### III.2.1 Separación por Arrastre de Aire

La mezcla de plásticos, papel y metal, ya melidos anteriormente, puede ser separada en un clasificador de aire. Se han diseñado un gran número de clasificadores de diferentes tipos, tanto comerciales como experimentales.

Un clasificador experimental de buena potencia, gran capacidad y barato, es el diseñado por la "Bureau of Mines" el cual esta representado esquemáticamente en la figura 3.2

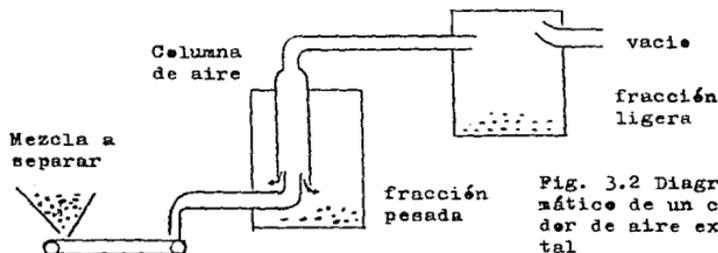


Fig. 3.2 Diagrama esquemático de un clasificador de aire experimental

Este clasificador es capaz de separar de 25-40 kg/hr de mezcla. La columna de aire tiene un diámetro de 12 cm y la velocidad alcanzada en ella es de aproximadamente 150 a 230 m/min durante su funcionamiento 14, 15, 38.

Comercialmente, la compañía alemana "AM Svenska Fluktfabrik", propuso un clasificador de aire muy parecido al anterior. La diferencia es que en éste clasificador, la columna es del tipo Zig-Zag o ondulante.

Un ventilador es lo que mantiene seca a la mezcla que entra al clasificador y así facilitar la separación.

La fracción ligera consiste por lo regular de papel, trazas de plástico melde y textiles. La fracción pesada consiste de mezcla de diferentes plásticos, metales, trazas de papel, etc <sup>1</sup>.

### III.2.2 Separación por Aplicación de Calor

Estos métodos que se muestran a continuación, separan la mezcla de plásticos y papel, utilizando calor, con el fin de ablandar y contraer el plástico y separarlo del resto de los desechos.

#### III.2.2.1 Método del Cilindro Caliente <sup>3, 13</sup>

Este método separa los desperdicios termoplásticos por contacto con un cilindro metálico rotatorio caliente, diseñado en los EUA.

En este equipo, los desperdicios son conducidos por una banda transportadora, que pasa por un cilindro de chrome-plata rotatorio, calentado eléctricamente; permitiendo con esto el contacto continuo con el material.

La parte termoplástica de los desechos se adhiere al cilindro caliente, de donde es raspada con una cuchilla fija, cayendo el producto raspado en una banda transportadora. La separación de los termoplásticos, de los demás desechos es del 90% aprox. En la tabla 3.1, se muestra la eficiencia del proceso.

Como todo, este método tiene sus desventajas, algunas son:

-Es baja la capacidad del equipo, porque los desechos deberán de apoyarse en la banda transportadora, formando una capa delgada de película plástica, lo que ocasiona que al pasar por debajo del cilindro caliente, se adhiera poco material a este.

-Existe el peligro de semielde de la parte termoplástica e formación de una superficie pegajosa en el cilindro, donde se pegan desechos de papel.

- La porción termofija quedará remanente, con la fracción de papel contenida en los desechos.

Tabla 3.1 Eficiencia del método del cilindro caliente.

Prueba	Veloc. del cilindro, rpm	Temp. del cilindro, °C.	Cantidad de plástica, %.	Veloc. de alimentación lb/in	Eficiencia, %	Papel separado con plástica, %
1	70	365	15	19	95.6	4.1
2	120	365	5	10	81.6	0.8
3	70	365	5	10	76.2	2.1
4	120	365	15	10	73.1	
5	120	365	5	19	50.0	1.1
6	70	365	15	10	87.3	2.6
7	120	320	5	10	38.4	0.7
8	70	320	5	19	86.3	1.2
9	120	320	15	19	84.2	0
10	120	320	5	10	76.6	1.9
11	70	320	15	10	54.3	2.3
12	120	320	15	10	87.3	2.0
13	70	320	5	19	73.0	1.5

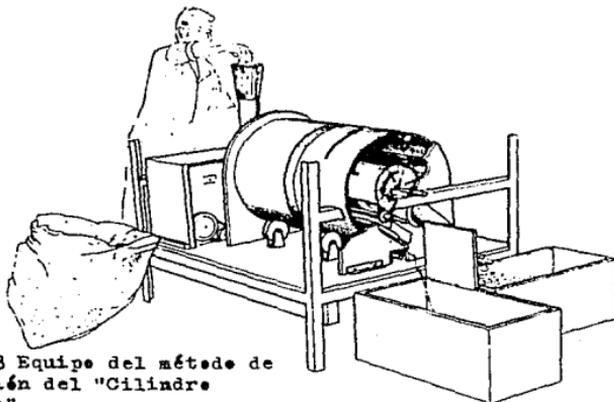


Fig. 3.3 Equipo del método de separación del "Cilindro Caliente"

### III.2.2.2 Método de Reducción por Calor

El método de contracción por calor es otro método diseñado para separar la parte termoplástica, de los desechos de papel. Es basado en la reducción del área superficial específica de las películas plásticas por la acción del calor.

La mezcla del plástico y el papel, es transportada en una corriente de gas, la cual causa una reducción en el área superficial de la parte termoplástica, colapsándose así misma. La separación de la mezcla es realizada en un separador de aire, como el que ya tratamos. El método requiere una temperatura uniforme, a través de toda la unidad y para conseguir una reducción efectiva, la temperatura de salida del equipo de calentamiento deberá ser mayor de los 120°C. La figura 3.4 muestra el diagrama del equipo.

El proceso fue desarrollado originalmente, para la recuperación de fibra de papel; pero se presta especial interés al ver, que la parte termoplástica se separaba casi completamente de la parte de papel. 14, 15, 37

Calentador

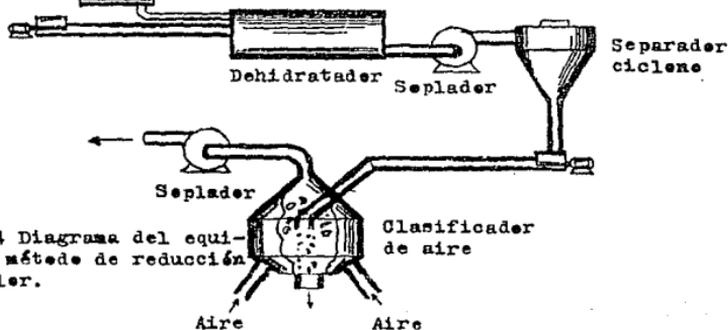


Fig 3.4 Diagrama del equipo del método de reducción por calor.

### III.2.3 Separación Electrodinámica

El método electrodinámico fue desarrollado por "The Bureau of Mines", para separar los metales de la mezcla, con plásticos y papel, empleando las características electrodinámicas de los anteriores.

En el proceso, el material es molido a un tamaño de partícula entre 1 y 3 plg., en nuestro caso, no olvidar que ya viene molido desde el principio. La mezcla es alimentada al separador por medio de una banda transportadora, para caer en un tambor rotatorio, el cual se encuentra cargado eléctricamente, haciendo contacto con una corona o campo eléctrico, formada entre un electrodo de aluminio y el tambor. El plástico se adhiere al tambor, siendo removido por una cuchilla fija, colocada en la parte inferior del tambor; mientras que el metal y el papel son atraídos hacia el electrodo, en forma magnética.

Las investigaciones indican que, se realiza la mejor separación de la muestra, cuando el contenido de humedad es mayor del 50%, el voltaje aplicado al electrodo se encuentra entre el rango de 3.5 a 5 kv y la separación entre el electrodo y el tambor es de 6 plg. La figura 3.5, muestra en forma esquemática el separador electrodinámico 16, 17.

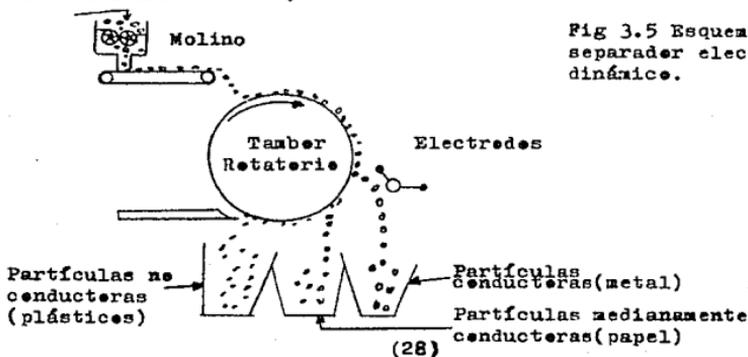


Fig 3.5 Esquema del separador electrodinámico.

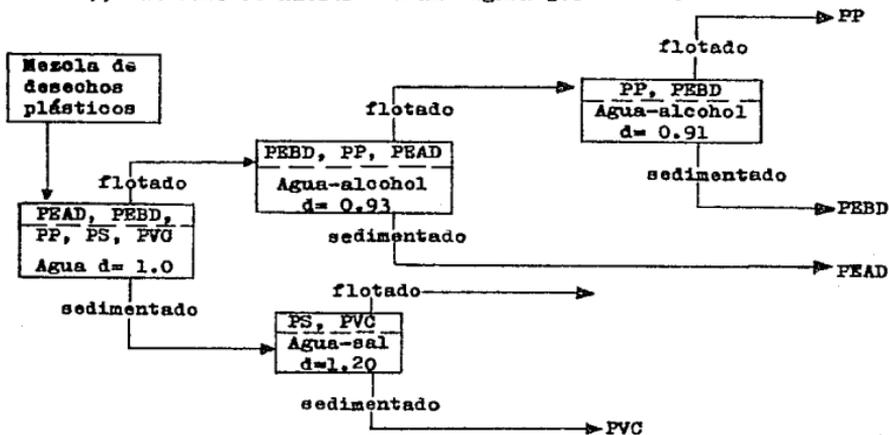
### III.2.4 Separación del Polietileno de la Mezcla de lásticos: Método por PLOTACION/SEDIMENTACION

El método por Flot/Sed aprovecha las diferentes densidades de los distintos plásticos presentes en la basura urbana. En la tabla 3.2, se muestran las diferentes densidades de los cinco plásticos más comunes en la basura.

Tabla 3.2 Densidad de Plásticos Puros

TIPO	DENSIDAD ( $\text{g/cm}^3$ )
Polipropileno (PP)	0.90
Polietileno Baja Densidad (PEBD)	0.92
Polietileno Alta Densidad (PEAD)	0.94 - 0.97
Poliestireno (PS)	1.05 - 1.06
Cloruro de Polivinilo	1.22 - 1.38

La separación de los cinco tipos de plásticos, se realizó en un recipiente sin agitación, usando cuatro diferentes líquidos: a agua destilada ( $d = 1 \text{ g/cm}^3$ ), dos soluciones de agua y alcohol ( $d_1 = 0.93$  y  $d_2 = 0.91$ ) y una solución alcalina de cloruro de calcio ( $d = 1.20$ ), tal como se muestra en la figura 3.6 1, 2, 3.



La figura anterior, muestra el uso de diferentes soluciones con sus respectivas densidades, las cuales pueden generar los requerimientos prácticos para el enjuagado, disposición del desecho y control de las densidades de las soluciones. Este método da completamente la separación de las muestras colectadas a mano.

Ahora, si el sistema trabajara con agua solamente, sería excelente. Para esto, se diseñó y construyó un separador hidráulico experimental, en donde se utiliza solamente agua, como medio de separación. La mezcla plástica fue separada en tres fracciones: Poliolefinas (PO): polipropileno, polietileno baja y alta densidad; Poliestireno (PS) y Cloruro de polivinilo (PVC).

La figura 3.7 muestra el esquema del separador combinado, con una unidad de flotación/sedimentación y otra de elutriación (operación de separar por decantación, las sustancias pulverizadas y mezcladas con agua, para que los más pesados queden en el fondo).

La mezcla de plásticos, cortada previamente, se alimenta al separador de flot/sedimen, en donde las poliolefinas se recuperan por flotación y los otros componentes de la mezcla por sedimentación. La parte sedimentada -PS y PVC- se transporta por medio de un flujo de aire a la siguiente sección, que es la de elutriación, en la cual se recupera el PS por la parte superior y el PVC por la inferior. Las partículas separadas fueron captadas en un tamizador y el agua se recircula al depósito principal. La velocidad de alimentación de la mezcla de plásticos, dio resultados satisfactorios en un rango de 5 a 25 kg/hr.

Como el modelo funciona bien, puede ser proyectado a escala industrial, cubriendo la cantidad de desperdicios plásticos, con buenos resultados. La eficiencia del método se muestra en la tabla 3.2.

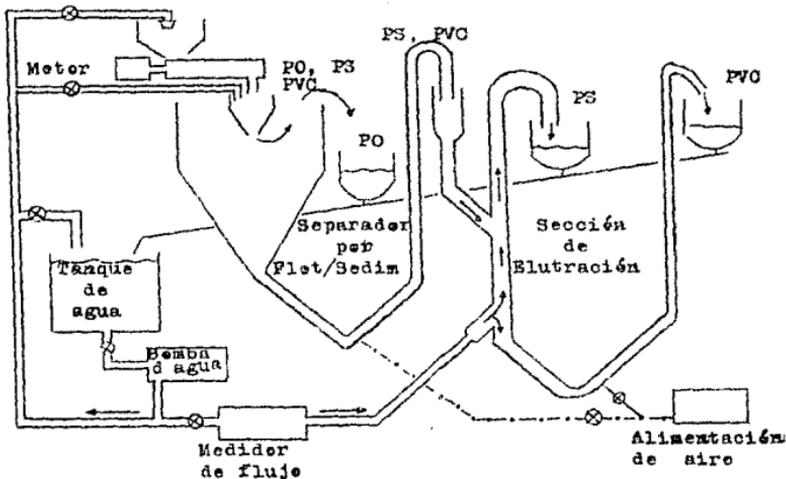


Fig 3.7 Diagrama esquemático del separador hidráulico

Tabla 3.2 Análisis de las fracciones obtenidas en el separador hidráulico

Plástico	Alimentación (% en peso)	Fracción obtenida (% en peso por densidad $\text{g/cm}^3$ )			
		1.0	1.0-1.2	1.2-1.5	$>1.5$
PO (PEAD, PS PEBB)	48	97.0	3	-	-
PS	33	0.5	95	4.5	-
PVC	19	-	28	40.0	32

BIBLIOGRAFIA: 1, 2, 3, 5, 13 - 19, 37, 38.

## CAPITULO IV

### DEGRADACION DEL POLIETILENO

La degradación en los materiales plásticos, dentro de las condiciones normales de uso, es un factor que limita notablemente la aplicación y versatilidad de estos materiales. Sin excepción todos los polímeros, entre los que se encuentra el polietileno, son degradados eventualmente por el medio ambiente, al cual están expuestos en su ciclo de vida y también, por las condiciones propias del proceso e reproceso de fabricación de los mismos.

La degradación afecta en forma inversa a la reacción química de polimerización y generalmente es vista como un proceso de deterioro. Así, una sustancia degradada, reduce su complejidad como compuesto químico. Pero, no siempre es vista como dañina, por ejemplo, es una alternativa a nuestro problema de disposición de la basura, ya que si bien es cierto que, el plástico no es biodegradable, con las reacciones de degradación puede hacerse factible que lo sea, pero el problema que esta degradación natural tarda mucho tiempo de llevarse a efecto y en sí, no resuelve nuestro problema. Por otro lado, en nuestro caso, queremos también reutilizar los desperdicios plásticos de la basura, entonces la degradación si es dañina, debido a que esta presente en el material a reprocesar y además se hace presente en el reprocesamiento 21, 28.

Las reacciones de degradación, en el polietileno, llevan consigo:

- a) Disminución del peso molecular, debido a ruptura de enlaces.
- b) Incremento del peso molecular, debido al entrelazamiento.
- c) Formación de insaturaciones, debido a la formación de radicales libres 21

El grado de deterioro de las propiedades del polímero, depen--

den, de los procesos químicos involucrados. A menudo, el curso de las reacciones de degradación son complicadas; pero se han propuesto mecanismos para explicarlas.

Desde el punto de vista del mecanismo, las reacciones de degradación se clasifican al azar y en cadena.

- Las reacciones de degradación al azar, son aquellas en las cuales, el esqueleto macromolecular se rompe al azar; conduciendo a fragmentos de peso molecular menor a la del compuesto molecular.

- Las reacciones de degradación en cadena, son las que corresponden a una liberación de unidades monoméricas sucesivas, a partir de una extremidad de la cadena.

Como se dijo anteriormente, estas reacciones son sensiblemente inversas a la reacción de polimerización.

Tanto en el medio ambiente, como en las condiciones del proceso, los factores más importantes, que causan la degradación, son: el calor, el oxígeno presente y la radiación ultravioleta de la luz solar. Por esto, es que, solo explicaremos de manera general, las degradaciones propuestas en el índice y que explicaremos a continuación.

#### IV. 1 Degradación Termoóxidativa

El polietileno posee grupos, capaces de absorber el oxígeno - que se encuentra como componente del aire, formando radicales libres, en forma particular cuando el polímero se encuentra sujeto a energía térmica o fotoquímica.

Estos radicales libres generan reacciones, generalmente "autocatalíticas", que producen el rompimiento del enlace molecular y - que al combinarse con el oxígeno forman radicales peróxidos y otros

grupos exifuncionales. El resultado de estas reacciones de degradación, son cambios en las propiedades del material, como: agrietamiento, disminución de la resistencia a la tensión, a la elongación, cambios en la dureza, en el color, brillo, disminución en el peso molecular e incremento en el índice de fluidez.

También en estas reacciones de degradación se producen ramificaciones e entrecruzamientos que traen como resultado: aumento en el peso molecular y disminución en el índice de fluidez; hasta que finalmente se presenta la falla mecánica en el polímero <sup>25</sup>.

A la degradación que produce el rompimiento de la cadena molecular, por la acción combinada del oxígeno presente y la temperatura, ya sea, en el medio ambiente o en el proceso, se le denomina Degradación Termoóxidativa <sup>22</sup>.

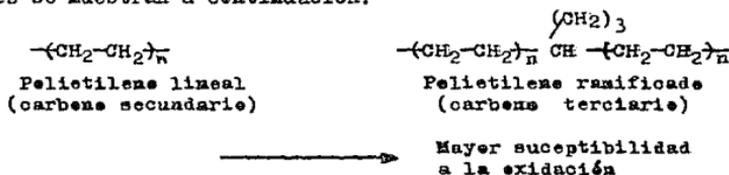
La degradación termoóxidativa, por las condiciones en las que se lleva a cabo, es generalmente "autocatalítica", y se le denomina Autooxidación.

La autooxidación se define como la oxidación térmica que se lleva a cabo, entre la temperatura ambiente y alrededor de 150°C, - precediendo por un típico mecanismo de reacción, por radicales libres y en cadena (como se verá en un inciso posterior) <sup>21</sup>.

El que el polietileno sea susceptible a las reacciones de degradación, depende mucho de la estabilidad del compuesto. Estas variaciones de estabilidad se deben principalmente a las diferencias de estructura química y física e a impurezas que promueven la degradación, como los residuos de catalizadores, productos de polimerización, moléculas parcialmente degradadas; que aún cuando están solo como residuos, catalizan las reacciones de degradación, influyendo en la estabilidad del polímero <sup>25</sup>.

#### IV.1.1.1 Rompimiento de Cadenas

De acuerdo con las energías de disociación, las uniones carbono-hidrógeno son más susceptibles a la disociación, que las uniones carbono-carbono en el polietileno, en presencia de irregularidades moleculares, como ramificaciones azerosas e grupos activos, por lo que es más fácil extraer un hidrógeno de un carbono terciario, que de uno secundario o primario de la molécula polimérica. De aquí se desprende entonces, que el polietileno ramificado sea más susceptible a la oxidación, que el polietileno lineal, que son las dos formas estructurales, en las que se presenta el polietileno, las cuales se muestran a continuación:



Otros factores que influyen en la facilidad de extracción del hidrógeno, es el volumen de la macromolécula e impedimento estérico de los enlaces adyacentes y también por la presencia de los grupos carbonilos, carbonílicos, insaturaciones e cualquier otro grupo aceptor de electrones. El polietileno comercial contiene muy poca cantidad de estos grupos <sup>21</sup>.

La degradación de los polímeros también depende de su estructura física, la cual se relaciona con el arreglo molecular ordenado (cristalino) e el desordenado (amorfo) de las diferentes regiones que forman la matriz del polímero.

El polietileno puede poseer regiones cristalinas y amorfas al mismo tiempo. Cuando el polietileno se encuentra con regiones cris-

talinas, el oxígeno no puede penetrar en ella, por estar muy compactada. Por consiguiente, la oxidación del polietileno se restringe solo en su región amorfa, excepto cuando la reacción se lleva a cabo en la superficie de la región cristalina o cuando el polietileno tiene regiones semicristalinas <sup>23</sup>.

La figura 4.1, muestra el efecto de estos factores físicos, en la degradación del polietileno lineal y ramificado, haciendo una comparación de ello.

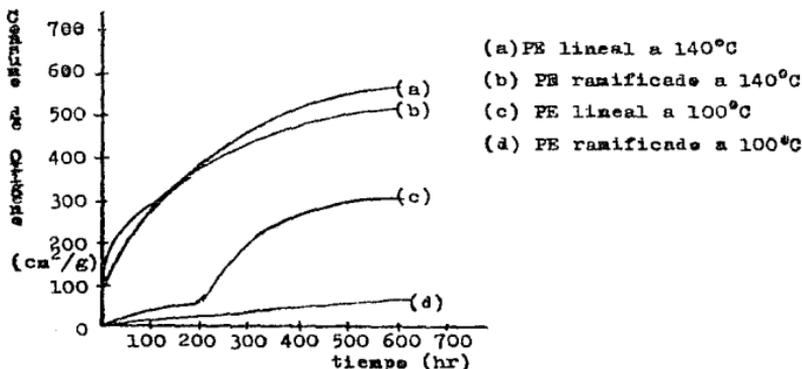


Fig 4.1 Efecto de la estructura física sobre el consumo de oxígeno en el Polietileno (PE).

A la temperatura de 140°C, ambos polietilenes se encuentran en la forma amorfa, por situarse a una temperatura, muy por encima de su temperatura de fusión (120-130°C) y se comportan de una manera similar, absorbiendo la misma cantidad de oxígeno o más bien casi, después de la reacción de degradación. En cambio, a 100°C, los pe-

lietilenos se encuentran en estado semicristalino y la cantidad de oxígeno absorbido por cada uno de ellos, es proporcional a su grado de cristalinidad; dando como resultado que el polietileno ramificado absorba más oxígeno que el polietileno lineal. Abajo e cerca de la temperatura de fusión, los dos tipos de polietileno absorben aproximadamente, la misma cantidad de oxígeno, por encontrarse ambos, en el estado cristalino <sup>20</sup>.

Los efectos de la oxidación en los polímeros, son más notorios en compuestos de bajo peso molecular y están siempre asociados, con el rompimiento del enlace carbono-carbono.

En los polímeros de alto peso molecular, se observan cambios en la viscosidad, debido al rompimiento al azar de los enlaces. Esto conduce a la reducción en el peso molecular de las cadenas, durante el procesamiento y durante la exposición subsecuente a las condiciones ambientales <sup>28</sup>.

#### IV.2 Fotodegradación

En este caso, la condición ambiental de mayor importancia es la luz solar. De los componentes de la luz solar, la radiación ultravioleta (UV) es la responsable del inicio de las reacciones de degradación.

La radiación UV es una radiación no ionizante, capaz de romper moléculas que son degradables, e bien, al igual que en el caso anterior, formar radicales libres que puedan iniciar una reacción de degradación.

La radiación UV se encuentra en un rango de longitud de onda de 290 y 400 nm., en medio de la de los rayos X y de la luz visible, que forman parte de la luz blanca que proviene del sol <sup>26</sup>.

- La radiación UV puede obtenerse de fuentes artificiales como son:
- a) Lámparas de vapor de mercurio: de alta y baja presión.
  - b) Lasers.
  - c) Arces de plasma.
  - d) Lámparas fluorescentes tratadas con fósforo.<sup>23</sup>

La absorción de la radiación, en una molécula, se debe a una interacción específica de los diferentes o algún grupo cromóforo; absorbentes de luz que se encuentran en el polímero, con un fotón de una energía dada <sup>22</sup>.

La radiación UV es absorbida por la molécula, que se promueve de su estado basal a algún estado de excitación y requieren transferir su energía absorbida para poder regresar a su estado base. Una molécula que se excita transmite la energía absorbida como radiación y regresa después a su estado basal, o bien, cuando la radiación UV recibida sea lo suficientemente grande para romper los enlaces, la molécula se disgrega formando radicales libres, que dan inicio a otras reacciones químicas <sup>23</sup>.

La Fotodegradación se encuentra en íntima relación con la oxidación, por lo tanto, al conjunto complejo de reacciones químicas, en las cuales participan principalmente la absorción de la luz UV y el oxígeno presente en el medio, se le llama Degradación Fotooxidativa <sup>21, 22, 23</sup>.

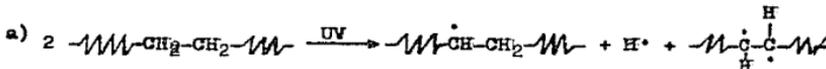
La Fotooxidación es difícil de detectarla, al inicio se presenta solo en la superficie del polímero, al prolongarse la exposición se observa una ligera deceleración, superficie agrietada, aumento en la fragilidad, pérdidas de las propiedades mecánicas y eléctricas. <sup>27</sup>.

La radiación UV en el polietileno puede provocar una reacción de degradación o un entrecruzamiento, dependiendo de la estructura química del polímero y de las sustancias presentes en la resina, o bien, suceder ambas fenómenos.

#### IV.2.1 Formación de Radicales Libres

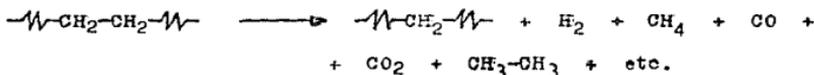
Cuando la radiación UV es absorbida por una molécula, la energía del fotón absorbido es transferida a la molécula absorbente; - si la cantidad de energía absorbida es más grande que la energía de enlace de las unidades estructurales de la molécula, los enlaces pueden ser rotos <sup>23</sup>.

En general, la Fotooxidación se lleva a cabo en forma similar a la termooxidación; ambas van vía radicales libres y reacción en cadena, pero la longitud de las cadenas oxidadas en la fase de propagación son mucho más cortas que la termooxidación y el inicio de la reacción es más complejo. Ahora bien, si el polietileno consistiera solo de enlaces C-C o C-H, la absorción de la radiación UV fuera despreciable, pero tiene en sus estructura debiles enlaces, que se forman por las altas temperaturas de radiación existentes, tal como se muestra a continuación <sup>27</sup>.



La formación de debiles ligaduras y la captura de radicales li bres originan en el plástico, cambios de color.

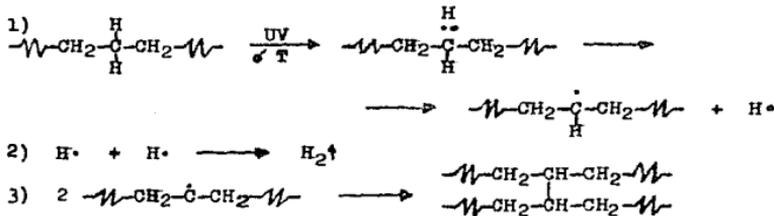
Cuando se irradia el polietileno y se encuentra presente el oxígeno, se forman gases cuyo desprendimiento es retardado, aparte del hidrógeno que es el producto más volátil, se desprenden otras moléculas como el monóxido y dióxido de carbono, y otras más, como se muestra en el siguiente mecanismo:



Definitivamente, estas reacciones se notan más en condiciones de alta temperatura, mayores que la temperatura ambiente. Por consiguiente, si se calienta el polietileno irradiado, arriba de su punto de reblandecimiento, se forman burbujas de gas en la muestra, originando un resquebrajamiento en la cadena principal. Este efecto origina que se degrade el polietileno, o bien que sufra un entrecruzamiento de las cadenas.

#### IV.2.2 Entrecruzamiento

El entrecruzamiento del polietileno lineal se refleja en el polímero, cuando éste se hace duro y brillante, mejorando sus propiedades mecánicas, conforme aumenta el grado de entrecruzamiento y por lógica, aumenta el peso molecular del plástico. A continuación se muestra un esquema de este proceso <sup>23</sup>.



El polietileno cuando se irradia en ausencia de oxígeno sufre de entrecruzamiento, pero en su presencia, el efecto principal es la ruptura de enlaces, o sea, la degradación<sup>23</sup>.

Con las condiciones anteriores se ve que el polietileno, es factible hacerlo biodegradable, con la degradación inducida o natural, a pesar de llevarse mucho tiempo para hacer esto. La otra alternativa es reprocesarlo, entonces se necesita que el plástico no se degrade, por lo tanto, se usan medios de estabilización, llamadas aditivos, para evitar esto.

#### IV.3 Estabilización del polímero contra la Termooxidación y la Fotooxidación.

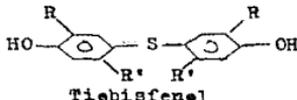
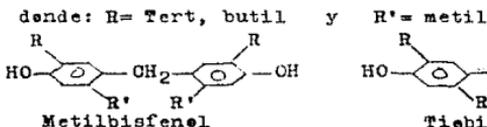
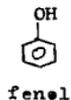
Como se vio anteriormente, el polietileno y todos los polímeros no son capaces de soportar ningún cambio en su estructura, a exposiciones prolongadas de diferentes condiciones del medio ambiente o del proceso; lo que ha originado que las propiedades del plástico, no sean las adecuadas para el uso específico que se le quiera dar, y sobre todo, que disminuye el valor económico del material. Esto, ha creado la necesidad de combinar la resina plástica, con sustancias llamadas "aditivos", que lo protegen de la degradación ya mencionada. En esta parte trataremos a los aditivos, que actúan inhibiendo la acción del oxígeno, llamados antioxidantes; y la acción de la luz UV, llamados fotoestabilizadores, y a sea, en las condiciones finales de uso o por las del proceso.<sup>1</sup>

##### IV.3.1 Antioxidantes

Se usan dos tipos generales de antioxidantes: los antioxidantes primarios o de terminación de cadena y los secundarios<sup>1</sup>.

- Los antioxidantes primarios, tienen la función de transferir iones hidrógeno, a los radicales libres producidos, desde la etapa de propagación de la autooxidación. Los compuestos más uti-

lizados son: las aminas secundarias, como la disaliciliden-etilen diamina o la N-fenil-N'-ciclohexil-p-fenilendiamina; y los fenoles, que entre los más importantes están el fenol simple, metileno bisfenoles y los tiebisfenoles. Las estructuras se muestran a continuación:

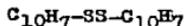


- Los antioxidantes secundarios, son los que descomponen o destruyen los grupos peróxidos, desde la etapa en la que se originan los radicales libres, transformándolos en compuestos no radicales. Los destructores de peróxidos más utilizados, y que también inhiben la corrosión, son los compuestos de azufre, tales como:

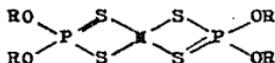


a) Los dialkilditiocarb~~am~~at~~os~~ metálicos, en especial de níquel, cobalto y zinc.

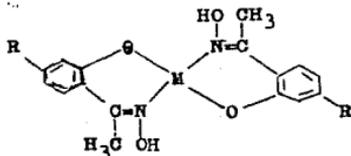
b) Los diaril sulfuro, como el naftil disulfuro:



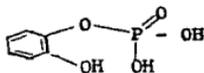
c) Los dialkilditiofosfatos de metal -zinc, níquel, cobalto-



d) Las oximas de la acetofenona de metal.



e) Los ésteres de fosfato cíclico



f) Las aminas, el negro de carbono, etc.

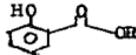
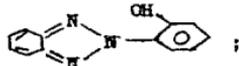
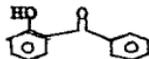
#### IV.3.2 Fotoestabilizadores

Los protectores contra la radiación UV, son de tres tipos:

1) Protectores; 2) Absorbedores y 3) Extintores de energía.

1) Protectores contra la luz UV, son las sustancias que se interponen como escudo entre el polímero y la fuente de radiación. Entre los más utilizados se encuentran: el polvo de aluminio, el negro de carbono, óxido de magnesio, carbonato de calcio, y otros.<sup>1</sup>

2) Absorbedores de luz UV, tienen la función de absorber la luz UV y disiparla inofensivamente, de tal forma que el material, no sea degradado. Los absorbedores de luz UV, más usados y efectivos son: las benzofenonas, benzotriazoles y los salicilatos, ejemplo de cada uno de ellos son <sup>23</sup>.

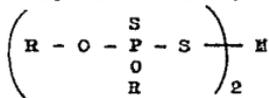
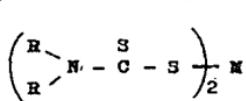


donde:  
R = H,  
metil

O-hidrobencfenona; O-hidroxibenzotriazol; Salicilate

3) Los extintores de energía e extranjeramente hablando "quencher", son las sustancias en donde la luz es absorbida por grupos cromóforos, que tienen la capacidad de tomar la energía de la molécula excitada, antes de que la reacción química se lleve a cabo, entre el grupo activo y el sustrato, disipando en forma inofensiva la energía que ha adquirido, evitando así la degradación.

Los extintores de energía, más utilizados, son por lo general quelatos de metales de transición, de níquel principalmente. Algunas estructuras de estos compuestos son <sup>22</sup>;



donde:

R=alquil

M=metal

BIBLIOGRAFIA: 20 - 28

## CAPITULO V

### RECICLADO DEL POLIETILENO

En 1970, se reportó el primer informe comercial del reciclado de los desperdicios plásticos, precisamente utilizando al Polietileno de Alta Densidad, provenientes de los desechos de envases de leche, para producir elementos usados en la construcción del drenaje.

Potencialmente, y a nivel planta piloto, el valor de los desperdicios se logra o puede ser recuperarlos al reprocesarlos para su uso, más como plástico, que como energético u obtención de químicos, ya que la última alternativa presenta serios problemas.

En este capítulo, presentamos las dos alternativas: métodos de reprocesamiento, como son el moldeo por extrusión y el de inyección; y la obtención de productos químicos y combustibles, a partir del plástico en estudio.

#### V.1 Moldeo por Extrusión

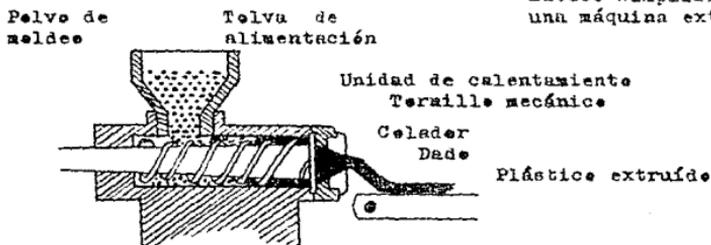
Una de las métodos de moldeo más importantes, para la producción de materiales termoplásticos, es la extrusión, y este es debido a las características siguientes:

- Es una operación continua.
- Es de los métodos menos caros.
- Procesa probablemente, en un tiempo determinado, una cantidad del material plástico mayor que cualquier otro método de moldeo.
- Los productos se obtienen en formas continuas y alargadas, tales como filamentos, varillas, tubos, películas, láminas y varias formas de perfiles <sup>1, 5, 19</sup>.

La extrusión consiste en plastificar la resina -fusionarla e ablandarla- por calor y presión en un cilindro hueco, forzándola con un tornillo a pasar por un dado, para obtener en forma continua la masa del plástico.

Para lograr esto es necesario que el extrusor cuente con ciertos elementos, el más usual es un cilindro provisto de un sistema de calentamiento, enfriamiento y control de la temperatura, dentro del cual hay un tornillo o gusano helicoidal, que es movido por un motor con su respectivo controlador de la velocidad, tal como lo muestra la figura 5.1 <sup>29</sup>.

Fig. 5.1 Diagrama esquemático simplificado de una máquina extrusora.



El extrusor se divide en cuatro zonas: alimentación, transferencia, compresión y desificación. El polietileno pasa por tres estados: al principio, como partícula sólida, luego como una mezcla de plástico fundido con partículas sólidas y finalmente como una masa totalmente plastificada <sup>30</sup>.

La zona de alimentación recibe el pelvo de meldeo del polietileno seco en forma de gránulos, bolitas, laminillas, frecuentemente premezclado con colorantes, a través de una telva dentro de la parte trasera del cilindro calentado y del tornillo revolvente; a medida que pasa o avanza la resina por gravedad, aumenta la presión. La resina entra a la zona de transferencia, en donde, un tornillo rotatorio mueve el material continuamente hacia adelante, a lo largo de un cilindro caliente, en donde se funde la mayoría del plástico. A medida de que el plástico fundido es empujado hacia adelan

te , entra a la sección de compresión del tornillo, ahí es completamente plastificado a una temperatura uniforme y compactado. Finalmente pasa a la zona de desificación, en donde el polietileno completamente plastificado, es forzado hacia afuera, a través de la abertura de un dado o boquilla, para darle el contorno deseado y regular el flujo del material plastificado, del cabezal al dado.

En esta forma, el extruder entrega el material fundido, para la transportación subsecuente en su acabado.

La mayor cantidad de polietileno se reprocesa para la obtención de película, que puede ser plana o tubular.

Algunas películas se hacen por la extrusión de un tubo y posteriormente se sopla aire, para extenderlo y adelgazarlo en la medida deseada. El tubo es entonces rasgado y aplanado para usarlo como película.

Para la película tubular se usa un dado o boquilla anular, y para las películas planas, un dado recto. 10, 29, 30.

## V.2 Moldeo por Inyección

El moldeo por inyección es usado para la formación de productos termoplásticos principalmente. Es un método muy parecido al moldeo por extrusión.

Los granulos del polietileno alimentado en una tolva, se calientan hasta que se plastifican, en un cilindro calentado previamente. El material es forzado a pasar a un molde por medio de un pistón, o como en el caso de la extrusión, por el avance de un tornillo rotatorio de plastificación, después de que se ha acumulado una cantidad adecuada del material en la parte inicial del tornillo o pistón. Cuando el polietileno plastificado llena el -

molde, este es enfriado con agua fría, obteniéndose así una pieza con la forma deseada, la cual es extruída al abrirse el molde. Antes de la inyección, el molde es calentado a una temperatura - justamente abajo del punto de ablandamiento del plástico, para - permitir con este, que el flujo llamo del material plástico fundi de pase a todas las partes del molde. El aire y el vapor, que s-e encuentran adelante del plástico fundido que entra, son empujados afuera, por medio de agujeros de respiradero en el lado opuesto - del molde 1, 29.

Shreder y colaboradores estudiaron el procesamiento de los - desperdicios del polietileno baja densidad por inyección en mol-- des calientes, encontrando las siguientes condiciones del proceso:

Presión, 80 MPa.

Temperatura del cilindro, 235°C; PEBD virgen, Tcilindro= 220

La proporción de desperdicios del PEBD en la muestra fue de 2.5 a 3% 45.

### V.3 Pirólisis

La idealidad, en el uso de los desperdicios plásticos, es que, parte de toda la cantidad de estos se obtenga materia orgánica e inorgánica útil a la industria y que el residuo sirva como combustible.

La Pirólisis representa un método de reprocesamiento que cumple, en gran parte, con esta idealidad.<sup>1</sup>

Por definición, la Pirólisis es la descomposición física y química de los materiales orgánicos, causada por calentamiento en una atmósfera deficiente de oxígeno e con la atmósfera debidamente controlada.

Los estudios hechos sugieren la posibilidad de pirolizar los desperdicios en equipos convencionales y en el peor de los casos, con algunas adaptaciones de estos mismos.<sup>2</sup>

La ventaja de la pirólisis son <sup>1, 2</sup>.

- Los desperdicios polietilénicos y los demás sólidos de desecho, pueden ser convertidos en productos útiles con un buen valor químico y económico.

- El volumen de los desperdicios puede ser reducido en un 90% o más.

- El proceso de la pirólisis, con buenas condiciones de clima y del equipo, no contaminan el aire del medio ambiente, como en el caso del cloruro de polivinilo (PVC).

- El proceso requiere poco espacio y aunada a la ventaja anterior, las plantas pirólíticas pueden ser colocadas en ciudades, con su respectivo bajo costo de transportación.

- El proceso es un productor neto de energía.

- La energía es producida en formas utilizables, como por ejemplo, gas, carbón.

- Los componentes metálicos pueden ser recuperados, después de que los desperdicios han sido pirolizados.

En forma general, el rompimiento de los enlaces químicos, - por la influencia del calor, es el resultado de superar las energías de disociación de los enlaces de los componentes pirolizados. El rompimiento de los enlaces químicos del polietileno se nota - por, la disminución del peso molecular y por la producción de - productos gaseosos de bajo peso molecular. Frecuentemente, el polietileno se descompone a temperaturas mayores de 400°C, formando una buena cantidad de monómeros <sup>23, 33</sup>.

#### V.3.1 Polietileno como Fuente de Productos Químicos

Brandup, en sus investigaciones, encontró que el polietileno se piroliza en un rango de temperaturas de 400-800°C, dando como productos, el 95% de hidrocarburos líquidos de bajo punto de ebullición, olefinas, desperdicios, negro de carbón y una cantidad significativa de compuestos aromáticos.

<sup>1</sup> Kaniski-Siam, pirolizaron al polietileno a una temperatura de 740°C y los resultados los compararon con los de otros plásticos muy comunes y usados, tal como lo muestra la tabla 5.1

#### V.3.2 Polietileno como Fuente de Energía

Los productos gaseosos, resultado de la pirólisis, pueden ser utilizados como combustibles, para funcionamiento del reactor de la planta, disminuyendo la cantidad de energía externa.

Tabla 5.1 Productos de la Pirólisis del Polietileno y de otros -  
dos plásticos a 740°C, en % en peso

PRODUCTOS	POLIETILENO	POLIESTIRENO	C. POLIVINILO
Hidrógeno	0.5	0.03	0.7
Metano	16.3	0.3	2.8
Etileno	25.5	0.5	2.1
Etano	5.4	0.04	0.4
Propano	9.4	0.02	0.4
Isobutano	1.1	-	-
1,3-butadieno	2.8	-	-
Pent- y Hexano	2.0	0.01	-
Xileno y Etilbenceno	1.1	1.0	0.2
Benceno	12.2	2.1	3.5
Tolueno	3.6	4.5	1.1
Estireno	1.1	71.0	-
Naftaleno	0.3	0.8	3.1
Carbón	0.9	0.3	8.8
Acido Clorhídrico	-	-	56.3
Acido Sulfhídrico	-	-	-
Compuestos aromáticos y alifáticos de muy alto peso molecular	17.3	15.0	19.3

Los gases de la pirólisis del material polietilénico, trans-  
formado en gas combustible, pueden ser condensados en fase líquida,  
tanto acuosa como orgánica y reconvertidos en gasolina, diesel  
y aceites pesados <sup>34, 36</sup>.

Como combustible, el polietileno tiene un alto poder calorífico,  
lo cual, hace atractiva su recuperación de la basura. Comparando el  
valor energético del polietileno, con el de otras sustancias se ve  
que es una buena alternativa para ser utilizado como combustible,  
tal como lo muestra la tabla 5.2 <sup>46</sup>.

Tabla 5.2 Valor calórico de algunos materiales.

MATERIAL	VALOR CALORIFICO (Kcal/kg)
Basura	3,053.6
Cloruro de Polivinilo	5,495.2
Poliestireno	9,380.6
Polietileno	10,101.3
Gas Combustible	11,093.7

La Union Carbide Co., desarrollo y puso a prueba un sistema de pirólisis del polietileno y termoplásticos, con una capacidad de 0.035- 0.07 ton/día, que consiste de:

- Un extrusor, calentado electricamente, usado para comprimir fusionar e plastificar y bombear el plástico fundido a un tubo de pirólisis.

- Tubo de pirólisis, de diseño anular, que conserva la temperatura relativamente uniforme del plástico pirolizado.

- Un intercambiador de calor, que recibe los productos para su enfriado y posterior descarga al equipo que recobra el producto.

Este sistema se muestra a continuación en forma esquemática en la figura 5.2.

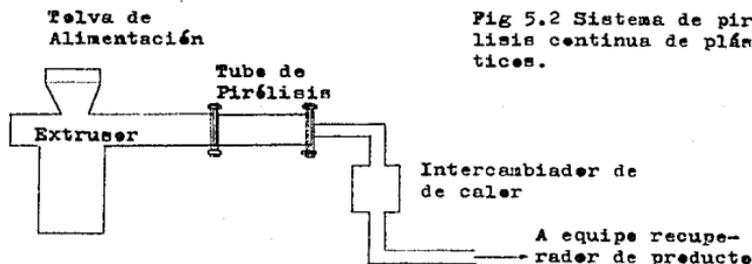


Fig 5.2 Sistema de pirólisis continua de plásticos.

Las tablas 5.2 y 5.3, muestran las condiciones de la pirólisis para el polietileno alta y baja densidad, respectivamente.

Tabla 5.2 Condiciones de la pirólisis del Polietileno Alta Dens.

TEMPERATURA (°C)

EXTRUSOR		Tubo de la pirólisis	Intercambiador de calor	Velocidad de flujo, g/hr
Zona de compresión	Zona de desificación			
350	460	437	215	2,700
350	460	457	205	2,580
350	460	465	150	2,500
350	460	505	195	1,800

Tabla 5.3 Condiciones de la pirólisis del Polietileno Baja Dens.

Temperatura del tubo de la pirólisis	Velocidad de flujo	Rendimiento (% en peso)
555	2058	97.0
600	2124	95.5
625	2496	90.3

Los problemas que se presentan en la pirólisis de los plásticos, son entre otros 1, 3, 19.

a) Como los plásticos tienen una conductividad térmica pobre, tardan en descomponerse térmicamente, dando como resultado una pequeña capacidad de reprecasamiento, en comparación con las dimensiones de los equipos de la pirólisis.

b) El carbón producido se adhiere a las paredes del reactor, en donde se lleva a cabo la pirólisis, dificultando la descarga continua de los productos.

c) Muchos plásticos al calentarlos y ablandarlos tienen al-

ta viscosidad, lo cual dificulta el transporte.

Las variables que rigen el proceso de la pirólisis son principalmente la temperatura y el tamaño de la partícula del material alimentado.

Con un aumento en la temperatura del proceso de la pirólisis, se tienen los siguientes efectos.

- La cantidad de los productos gaseosos y la descomposición de la alimentación aumentan.

- Disminuye el residuo sólido, debido a la conversión de éste en productos gaseosos.

- La cantidad de productos líquidos disminuye.

Para el polietileno, la temperatura adecuada para la obtención de químicos, se encuentra en un rango de 730 a 800°C y, como combustible, a 500°C en adelante.

Ahora bien, con respecto al tamaño de la partícula, se observa, que a una menor y a un uniforme tamaño de la misma, dará como resultado un mayor control de la temperatura, con sus respectivas ventajas. El tamaño de partícula más adecuado, se encuentra en un rango de 0.1 a 2  $\mu\text{g}$ .

BIBLIOGRAFIA: 1, 2, 3, 10-12, 29, 31-34, 37.

## CAPITULO VI

### DISPOSICION DEL POLIETILENO SIN RECICLAR

#### VI.1 Incineración

La incineración de los desperdicios, se define como "la reducción de los desechos a residuos inertes por una combustión de alta temperatura controlada."

Su propósito es el de producir óxidos estables, que puedan ser retornados al ambiente, sin causar transtornos a este, y el de reducir el volumen de tales desperdicios, en un 80-90% o más.

Un incinerador industrial de desperdicios consta básicamente de:

a) Sistema de manejo de materiales.- Su propósito es el de manejar apropiadamente el desecho plástico, de tal manera que pueda ser alimentado satisfactoriamente al incinerador.

b) Sistema de incineración.- Es el lugar donde se lleva a cabo la combustión de los desechos, y a su vez la completa oxidación de la carga y de las partículas suspendidas en la corriente de gas combustible.

c) Equipo de control de la contaminación.- Este equipo trata los gases de emisión y el agua que se utiliza en el equipo, antes de descargarlos al medio ambiente<sup>1, 5</sup>.

Con respecto al polietileno, Kaiser y Karetts hicieron estudios sobre la incineración de la basura, conteniendo diferentes porcentajes del polietileno en ella, en un rango de 0-4% en peso, demostrando que el contenido del plástico no causa cambios considerables en el proceso y por consiguiente, este se lleva a cabo satisfactoriamente. Es más, la incineración de la basura fue

más rápida y completa y el mal olor del gas que fluía como producto, fue menor.

Por otro lado, cuando se incineró solo el polietileno puro, se obtuvieron los siguientes resultados, que se muestran en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Condiciones de la incineración del polietileno puro.

TIPO	PM de las monómeros	Valor calorífico(BTU/lb)	Requerimiento de aire( $M_{O_2}/M_{comp.}$ )	Temp. de flama, °C/°F
PEBD	28.05	20,050	3	2120/3850
PEAD	28.05	20,050	3	2120/3850

Algunas condiciones para la incineración de los desperdicios plásticos son:

- 1) El incinerador debe de ser diseñado para una buena combustión y prevenir la creación de hollín.
- 2) Las paredes y el lecho del horno, deben resistir y mantener altas temperaturas, mayores de 1150°C.
- 3) Debe de diseñarse un buen equipo de suministro de aire , que provea al horno de 2.5 a 3 veces más que la cantidad teórica de aire requerido para la combustión.
- 4) Deberá tener un equipo de precalentado del plástico alimentado al incinerador.

Como para todo método de disposición de desperdicios, la incineración es apropiada, siempre y cuando, no ocasiona contaminación. Para su éxito se requiere:

- Una temperatura adecuada para la oxidación consistente del material.
- Mezclar completamente los gases de combustión.

- Un suministro constante de oxígeno, para que la reacción - se lleve a cabo en un alto porcentaje, sin que, el enfriamiento - de los productos de combustión sea excesivo.

Los problemas, que no son todos, que se presentan al incinerar el polietileno son principalmente:

a) La combustión origina hollín, el cual se pega en las paredes del equipo incinerador.

b) Como la incineración se lleva a cabo a temperaturas muy altas, estas pueden causar daños en el incinerador, en el caso de que el horno, este diseñado para trabajar con toda la basura.

c) Daños en el incinerador por el suministro insuficiente de oxígeno.

d) Corrosividad, por la emisión de productos gaseosos, como los del grupo carboxílicos,  $\text{RCOOH}$ , al contacto con el agua<sup>1, 3, 5</sup>

## VI.2 Relleno Sanitario

El relleno sanitario, es el método de disposición final de la basura más económicamente utilizado y aceptado desde el punto de vista estético, así como en lo referente al control de la contaminación del medio ambiente, siempre y cuando, se haya desarrollado con las normas técnicas existentes y la respectiva supervisión efectiva.

La "American Society of Civil Engineers" da la siguiente definición: El relleno sanitario es un método de disposición de la basura en las capas del suelo, sin originar molestias o daños a la salud pública, utilizando técnicas de ingeniería para, confinar

la basura en una area práctica más pequeña, reducir su volumen y cubrirla con una capa de tierra en intervalos de tiempo necesario.

Basicamente consta de los siguientes pasos <sup>1</sup>:

a) El desperdicio sólido es depositado en una area de terreno previamente preparada, de una manera controlada.

b) El desperdicio sólido es extendido y compactado en capas delgadas de aproximadamente 60 cm de ancho.

c) El desperdicio sólido es cubierto diariamente, con más frecuencia si es necesario, con una capa de tierra de aproximadamente de 15 a 25 cm.

d) El desperdicio sólido es compactado.

Como la operación no es continua, los materiales reciclables pueden ser separados en el lugar del relleno. Esto se hace, cuando el transporte que lleva la basura la deposita en el lugar, para luego comenzar la operación de "pepena".

El contenido de plástico en el relleno sanitario, reduce la efectividad de este, ya que el plástico es más abultado y con el mismo peso base, requiere un espacio mayor que otros materiales, además de que, se descompone muy poco y no son solubles en agua. Con todo este se incrementa el tiempo necesario para volver utilizar el sitio, otra vez, como relleno sanitario <sup>35, 36</sup>.

El polietileno enterrado se descompone principalmente por la acción combinada de la oxidación y el ataque de roedores <sup>25</sup>.

Para un buen funcionamiento como relleno sanitario, resulta inevitable la pepena de ciertos desperdicios antes de ser enterrados, como son los metales, vidrio, plásticos rígidos y de película, artículos de cerámica y todos aquellos materiales que tardan mucho tiempo en descomponerse.

El relleno sanitario, deberá cumplir con los siguientes requisitos para su diseño:

- No deberá producir contaminación de la superficie terrestre y del agua superficial.
- No deberá contaminar la atmósfera sobre el relleno.
- No deberá contaminar el lugar del relleno, para reutilizar el mismo en tiempos posteriores.
- No deberá emitir gases tóxicos.

Para prevenir lo anterior se recomienda lo siguiente:

1) El área de disposición del relleno sanitario, debe encontrarse lejos de fuentes de agua, tales como manantiales, lagos, arroyos y ríos.

2) En el caso de que este a corta distancia, el relleno debe ser cubierto con una capa de tierra, de tal forma que sea impenetrable el agua.

3) Prever al sitio de un buen sistema de drenaje.

4) Como el relleno sanitario produce metano y otros gases tóxicos e inflamables, se debe diseñar de tal forma que permita el escape de estos gases a la atmósfera.

5) Luego de utilizada el área de disposición como relleno sanitario, deberá ser cerrada, evitando todo trabajo o contacto con ella, hasta después de un tiempo determinado, logrando con esto, que el material en el relleno sea biodegradado o descompuesto<sup>1</sup>, 36.

## CONCLUSIONES

Cada día que pasa, la contaminación del medio ambiente por los desperdicios polietilénicos y plásticos va en aumento; más aún, que la producción del plástico es mayor en forma constante.

A pesar de tener bien identificado el problema, poco se ha hecho para resolverlo, sobre todo en nuestro país.

La acumulación del plástico en la basura, es muy patente, sobre todo en las ciudades con un gran número de habitantes.

Con esto, se nos presenta la enorme responsabilidad de conocer y poner en práctica distintos métodos de reutilizar los desperdicios, que en la basura se encuentran, más si tomamos en cuenta que, antes de ser desechados fueron productor que nos dieron una utilidad, y que si se reprocesan, pueden seguir cubriendo nuestras necesidades <sup>8</sup>.

De las diferentes alternativas de disminución de los desperdicios polietilénicos, presentados en esta tesis, la que más ventajas presenta para ser utilizada, es la del reciclado de tales desperdicios, por la propiedad que tiene el polietileno de ser un termoplástico y ser la resina de mayor producción y uso, además de fuente de productos químicos, la oportunidad de utilizarlo como combustible, y lo mejor de todo, la obtención de retribuciones económicas y la disminución de la contaminación ambiental.

Por ahora, existen diferentes factores que hacen que el reprocesamiento no sea conveniente, algunos de los cuales son<sup>1, 2</sup>.

- Bajo precio de venta del material reprocesado proveniente de la basura. Más aún, el mercado de estos productos es aún limitado. Lo que se necesita primero, es hacer un estudio y análisis de este mercado.

- Aspectos de sanidad pública, se encuentra prohibido el uso de los desperdicios plásticos en la fabricación de recipientes para empaque de alimentos.

- Se necesita una completa separación de los desperdicios pelietilénicos de los demás plásticos. Como se vio anteriormente, existen plásticos que no, son compatibles estructuralmente para - ser reprecésadas, como los termofijos; y los que son compatibles, los termoplásticos, disminuyen sus propiedades como productos terminados, al reprecésarlos en forma de mezcla.

- Un factor muy importante, es que se necesita un suministro constante de materia prima, y en la actualidad no se cumple con esta condición.

La degradación del plástico es una buena alternativa, pero es muy lenta, aunado a que no se conocen con exactitud sus mecá--nismos de reacción <sup>23</sup>.

La incineración, a pesar de ser una buena alternativa para - reducir la basura, encuentra sus inconvenientes en el costo del equipo, mano de obra, y como no es lógico que se le incineren - los desperdicios pelietilénicos, el aumento de la contaminación - se haría patente en el aire, por los gases tóxicos que se despiden al llevarse a cabo esta operación.

El método utilizado (más) hoy en día, el relleno sanitario, no resuelve en gran parte el problema de la contaminación ambiental, debido a que no se separan los desperdicios plásticos y sólidos, lo que ocasiona que el terreno utilizado para este fin, no pueda ser utilizado en un tiempo posterior corto <sup>8</sup>.

Por lo anterior, se puede concluir que el único medio efecti

ve para reducir la cantidad de desperdicios plásticos y por ende, la contaminación, es el reciclado.

Sin embargo, para implantar este sistema, se necesita tomar en cuenta, de que las plantas beneficiadoras de los materiales plásticos se deben encontrar cerca de los lugares de recuperación; de lo contrario, el gasto por transporte aumentará considerablemente el precio de tales desperdicios y la obtención de materia prima no será ya a bajo costo.

Sería una ventaja y una necesidad, de que se educará a la población, para que separe los desechos a nivel doméstico, y con este, transportarlos directamente a la planta beneficiadora.

Con lo anterior, se recomendaría a las instituciones gubernamentales, que establecieran políticas de solución a este problema, planteando las diferentes resoluciones con respecto a los siguientes puntos:

- Realizar campañas públicas, exhortando a la población en general a que separen los desechos plásticos y los demás desperdicios sólidos útiles, que se encuentran en la basura, valiéndose de los medios tradicionales de enseñanza, a través de escuelas y medios masivos de difusión.

- Establecer sistemas para la recolección de tales desechos, por parte de organismos competentes, tanto públicos como privados.

- Pedir a los fabricantes de plásticos que utilicen claves, marcas, símbolos o nombres de los plásticos, en los productos que fabrican, para lograr su identificación y facilitar el proceso de selección a la hora de recolectarlos. Retomando la responsabilidad de mejorar los procesos e utilizar mejores tecnologías, tendiendo a disminuir los desechos.

- Promover la creación de centros de investigación científica y tecnológica, y una vez invitado y motivado a la iniciativa privada, para que en forma mancomunada o sola, encuentren métodos económicamente redituables para la solución del problema que se está tratando.

Finalmente, se vuelve imperiosa la necesidad de crear conciencia en la población de la gravedad del problema, que representa la contaminación, por los desechos humanos; ya que si no se hace un esfuerzo constante, irremediablemente sucumbiremos a nuestra propia negligencia.

## APENDICE

### DEFINICIONES EN LA INDUSTRIA DE LOS POLIMEROS

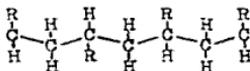
Las siguientes definiciones fueron ordenadas como se puede ver, en orden alfabético; evitando así, extenderse mucho en un tema. Se trate de ser lo más conciso posible.

**ADICION, polímero por.-** Polímeros en los cuales el monómero tiene la misma composición del monómero del que se derive; no hay pérdidas de moléculas durante la reacción. No contienen grupos funcionales en su cadena principal. Las uniones entre los monómeros son generalmente carbono-carbono.

**AGLOMERANTE.-** Material que permite al compuesto polimérico mantenerse siempre unido.

**AMORFO.-** Polímero no cristalino e, las áreas no cristalinas de un polímero; la cadena del polímero está ordenada en forma desordenada. Tiene las siguientes características: tiene bajas fuerzas intermoleculares; tiene menor densidad que los cristalinos; presenta mayor deformación bajo esfuerzos y presentan un intervalo de fisión más amplio.

**ATACTICO.-** Conformación en la que el sustituyente, R, se encuentra en una secuencia al azar a lo largo de la cadena, sin presentar una simetría. Ejemplo:



**CADENA, polimerización en.-** Es aquella en la que la formación de cadenas de alto peso molecular se realiza inmediatamente después del inicio de reacción. La concentración del monómero disminuye a lo largo de la reacción a medida que aumentan las moléculas poli-

méricas de alto peso molecular.

COLORANTE.- Materia orgánica que da color al plástico.

COMERO.- Compuestos que no pueden polimerizarse con los de su misma especie, pero con otros diferentes que tampoco pueden polimerizarse con los de su misma especie, si son capaces de formar un polímero.

CONDENSACION.- polímero per.- Son aquellos formados por monómeros polifuncionales. En la estructura molecular de estos polímeros se encuentran ausentes algunos átomos presentes en el monómero d-a-l que se formó, pero contienen grupos funcionales formando parte de la cadena principal. Involucra la eliminación de pequeñas moléculas durante la reacción de polimerización.

CONFORMACION.- Simetría que guarda la estructura molecular de un polímero y sus sustituyentes respecto a un plano imaginario. Son de tres tipos: isotáctico, atáctico y sindiotáctico.

CONFORMERO.- Formas individuales producidas por los cambios en la configuración de un polímero.

COPOLIMERO.- Polímero formado por la unión de varios monómeros de diferente clase.

CRISTALINO, polímero.- Polímero con una estructura ordenada de una manera geométrica regular. Características: poseen fuerzas intermoleculares muy altas; poseen mayor densidad que los amorfos; presentan menor deformación bajo esfuerzos y presentan un intervalo de fusión estrecho.

CRISTALITOS.- Regiones ordenadas de una manera geométrica regular. El tamaño, la posición relativa y la orientación de estos cristallitos dentro de la fase amorfa, es la que determina las propiedades mecánicas del polímero.

**COVALENTE, enlace.**- Se forman cuando los átomos que participan en la formación del enlace comparten electrones en las capas de valencia de los átomos. Resulta cuando dos electrones, uno de cada átomo, se comparten equitativamente, sin que pertenezca de manera exclusiva a ninguno de los átomos.

**DIENOS poliméricos.**- Familia de los polímeros basada en hidrocarburos insaturados e dielefícos, que contienen dos enlaces dobles. Cuando los dobles enlaces son separados por un enlace simple se llaman dienos conjugados; cuando son separados por un mínimo de dos enlaces simples, se llaman dienos no conjugados.

**ELASTÓMEROS.**- Material que posee una baja tendencia a cristalizar. Soporta grandes fuerzas de deformación sin que se rompan y después de terminada la fuerza se recuperan espontáneamente, casi en su totalidad.

**ENLACE, de hidrógeno.**- Fuerzas de valencia secundaria fuertes entre el hidrógeno de una molécula con el oxígeno, nitrógeno y flúor de otra molécula y de la misma también, aunque en diferente posición.

**ENTRECRUZADO, polimérico.**- Dos o más cadenas unidas por enlace covalente del mismo polímero o de diferentes polímeros.

**Etapas, polimerización por etapas.**- Polimerización que se lleva a cabo con un incremento en el peso molecular del polímero, pasando de un monómero a dímero, luego a trímero y así sucesivamente. Una vez formadas las pequeñas moléculas pueden reaccionar indistintamente con cualquier molécula presente en la reacción. Se caracteriza por la rápida desaparición del monómero, aún de que cualquier molécula formada alcance un tamaño adecuado para ser útil en la prác

**FIBRA.**- Material que presenta un alto grado de cristalinidad sin llegar a hacerse totalmente cristalino.

**FUERZAS de Vander Wals.**- Son uniones de tipo secundario, que se refieren a la interacción entre moléculas neutras y moléculas dipolares, siendo las fuerzas de corto alcance.

**FUNCIONALIDAD.**- Número de posiciones o grupos reactivos o funcionales que existen en una molécula y que pueden reaccionar bajo condiciones específicas. Así una molécula monofuncional puede reaccionar en un punto; una bifuncional en dos y una polifuncional en varios puntos.

**GRADO de polimerización.**-Número de unidades, meras, que componen una cadena. Los polímeros, por lo tanto, están compuestos de cadenas de varias longitudes.

**GRANULOS.**- Compuestos moldeables en forma de esferas o cilindros.

**GRANULAR, estructura.**- Apariencia no uniforme de un material plástico no terminado, debido a la retención e incompleta fusión de partículas de distinta composición.

**HOMOPOLIMERO.**- Polímero resultante de la polimerización de un monómero simple; el polímero consiste de un tipo simple de unidades repetitivas, llamadas meras.

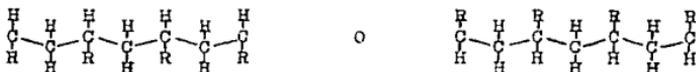
**INHIBIDOR.**- Sustancia capaz de retardar o parar una reacción química no deseada. Son usadas en ciertos monómeros y resinas para prolongar la vida de estas en el almacenamiento. Cuando son usadas para retardar la degradación de los plásticos contra el calor, luz, oxígeno, etc., se les llama estabilizadores.

**INICIADOR.**- Agente necesario en muchas reacciones de polimerización para dar inicio a esta.

**IONICA, polimerización (catiónica o aniónica).**- Proceso en el cual, el monómero o mezcla de monómeros es adicionado a agentes que -

contienen iones cargados electricamente, generalmente en solución con un líquido diluyente.

**ISOTACTICA.**— Es aquella conformación en la que un sustituyente, R, contenido en cada monómero, siempre se encuentra arriba o abajo de un plano imaginario. Por ejemplo:



**LUBRICANTE.**— Sustancia que previene que se pegue o adhiera el material al equipo y a los moldes; decrece la viscosidad del material haciéndole más fluido.

**MERO.**— Unidad repetitiva básica de la cadena de un polímero.

**MESOMERO.**— Radical repetitivo que al combinarse con otros mesómeros forma la porción principal de la molécula de un polímero.

**MONOMERO.**— Unidad básica a polimerizar, usualmente contiene carbono y es de bajo peso molecular.

**OLIGOMERO.**— Moléculas formadas por unos cuantos meros.

**PLASTICIDAD.**— Habilidad de un material para resistir la deformación continua y permanente de un exceso de tensión sin que el material sufra ruptura.

**PLASTICO.**— Materia orgánica, compuesta en forma parcial o total de combinaciones de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y otros elementos orgánicos e inorgánicos, que aunque sólido en su estado final, en alguna fase de su fabricación se hace líquida y por consiguiente, puede recibir diferentes formas, casi siempre mediante la aplicación separada o conjunta de calor y presión.

**PLASTIFICANTE.**- Sustancia de alto peso molecular, que le imparte flexibilidad al plástico, determina las características de flujo y viscosidad y proporciona una mejora de la resistencia al impacto sin disminuir la resistencia mecánica.

**POLIDISPERSO.**- Mezcla de polímeros que consiste de moléculas de diferente longitudes de cadena.

**POLIMERIZACION.**- Proceso químico que ocurre cuando moléculas simples reaccionan entre sí para formar un polímero.

**POLIMERO.**- Molécula gigante o macromolécula de alto peso molecular formada por la unión de múltiples unidades repetitivas sencillas, llamadas meros.

**POLIMERO LINEAL.**- Polímero formado por la unión de monómeros bifuncionales enlazados en forma de cadena.

**PUNTO de ramificación.**- Atomo en donde la cadena principal del polímero esta unida a otra cadena, produciendo así ramificaciones.

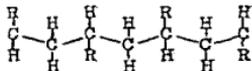
**RADICALES libres.**- Atomo o grupo de átomos que tienen al menos un par de electrones para compartir. Tienen tiempos de vida cortos, cuando son intermediarios de una reacción, y cuando tienen alta reactividad y alta energía son difíciles de aislar.

**RAMIFICADO, polímero.**- Polímero que tiene en su cadena principal, otras cadenas adyacentes a esta; que se forman por tener presente en la reacción moléculas con más de dos grupos funcionales. Tiene propiedad de molécula lineal; cuando tienen pocas ramificaciones; y adquiere las propiedades de la forma entre cruzada a medida de que se incrementa la complejidad de las ramificaciones.

**RESINA.**- Sustancia básica de alto peso molecular, que se mezcla con colorantes, cargas, plastificantes, etc., para la preparación

de un compuesto plástico comercial para moldeo.

SINBIOTACTICO.- Conformación en la que un sustituyente, R, contenido en cada monómero, quede arriba y abajo del plano imaginario de un polímero de manera alternada. Ejemplo:



SOLUCION, polimerización en.- Proceso de polimerización en el cual el monómero o la mezcla de monómeros es disuelto en un solvente o diluyente líquido que no contiene al monómero, al inicio de la reacción de polimerización. El líquido no necesariamente debe ser un solvente.

SUSPENSION, polimerización en.- Proceso en el cual el monómero o mezcla de monómeros es disuelta en una fase líquida, generalmente agua, por agitación mecánica y el monómero y el polímero formado son insolubles en ella. El iniciador y catalizador usados en la polimerización, son generalmente solubles en el monómero.

TELOMERO.- Polímero de terminación de cadena de bajo peso molecular.

TERMOFIJO, plástico.- Plásticos que al reblandecerse pueden ser moldeados bajo temperatura y presión. Una vez endurecidos, no es posible reblandecerlos otra vez, ni con calor, ni cambiando la estructura molecular de redes con ningún disolvente conocido, por lo tanto, son infusibles, insolubles, incombustibles (carbonizan antes de arder) e imputrescibles. Esto es debido a que en los termofijos, la estructura química es alterada por el calor y se producen materiales entrecruzados que no pueden volver a reblandecerse.

TERMOPLASTICOS.- Plásticos que por la acción del calor pueden ser

reblandecidos hasta el estado fluido, durante el cual, al aplicar seles presión pueden ser moldeados. Posteriormente, al enfriarlos por debajo de su temperatura de reblandecimiento se endurecen y - retienen la forma del molde. El proceso puede repetirse muchas veces, ya que en él no se rompen, ni se forman enlaces químicos primarios.

**VIRGEN, material.**- Componente plástico o resina que no ha sido usada o procesada.

**BIBLIOGRAFIA:** 12, 24, 42-45.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- Leidner Jacob. "Plastics Waste: Recovery of Economic Value" .  
ED. Marcel Dekker INC. USA, 1981.
- 2.- Golueke C. "Comprehensive Studies of Solid Waste Management" .  
First and Second Annual Reports. USA, 1970.
- 3.- Muñoz Sanchez A. "Residuos Sólidos Plásticos: Tratamiento y  
Reciclado". Publicación No. 19. ED. CIMPCA. Madrid, 1980.
- 4.- CONACYT. "Contaminación Ambiental". Información Científica y  
Tecnológica. Vol. 3, No. 49, 1981.
- 5.- Report of Bell and Richardson. "Solid Waste Management of -  
Plastics". Inc. Manufacturing Chemist Assoc. 1970.
- 6.- Laguna Castellanos O. y R. Arganza. "Estudios para el aprove-  
chamiento de los Residuos de Materiales Plásticos". Plástico-  
ticias. Agosto, 1981.
- 7.- Rangel Nefalle C. and Garcia Rejon A. "Products Polyetilen Ma  
nufactured Whit Well Characterized Recycled Resins". Chemical  
Eng. Com., 24, 147., 1983.
- 8.- Padilla Massieu C. "La Basura: ¿ Contaminante sin Solución ?"  
Cuaderno No. 1. ED. Movimiento Ecologista Mexicano. 1987.
- 9.- Seymour B.R. and T. Cheng. "History of Poliolefins: The World  
is Most Widely Use Polymers". ED. D. Reidel Publishing Compa-  
ny. Holland, 1986.
- 10.-Reafrew A. and P. Morgan. "Polythene: The Technology and Uses  
of Ethilene Polymers". ED. INTERSCIENCE PUBLISHERS INC. 1960.
- 11.-PEMEX. "Polietileno: Propiedades y Aplicaciones". 1983.

- 12.- Robert W. JONES. "Manual de Riegel's de la Industria Quimica". ED. J.A. Reinhold. 1961.
- 13.- Fyfe R.D. "Methods of Waste Thermoplastic Removal". US Pat. 3,599,783. 1983.
- 14.- Laundrie J.F. "Separation of Thermoplastic Film and Waste Paper". US Pat. 3,814,240. 1972.
- 15.- Laundrie J.F. and J.H. Klungress. "Dry Methods of Separation Plastic Films from Waste Paper". Paper Trade J. Feb 5, 1973.
- 16.- Bureau Mines. "Ionized Fields in Electrostatic Separation: Applications to Secondary Materials". Report RI 7503, 1971.
- 17.- GRUBS M.R. and K.H. Ivey. "Recovering Plastics from Urban Refuse by Electrodinamic Techniques". Technical Progress Report 63, 1972.
- 18.- Jarrel D. and B. Mugg. "Control of Contamination in Secondary Fiber Pulp. (Proceedings of the Pulp and Paper Seminar on Fiber Conservation and Utilization)". Chicago, 1974.
- 19.- Mack W.A. "Recycling Plastics: The problems and Potential Solutions". American Society for Testing and Materials. 1974.
- 20.- Hawkins W.L. "Polymer Degradation and Stabilization". ED. Springer-Verlag. Berlin, 1984.
- 21.- Reich Leo Ph. and S.S. Stivala. "Elements of Polymer Degradation". ED. Mc Graw Hill. 1971.
- 22.- Schabel W. "Polymer Degradation: Principles and Practical Application". ED. Hanser International. Berlin, 1981.
- 23.- Hellineck Hans H.G. "Degradation and Stabilization of Polymers". ED. Elsevier Science Publishers. Berlin, 1983.
- 24.- Chantiere G. y L. Monniere. "Introducción a la Química Macromolecular". ED. Mc Graw Hill, 1983.

- 25.- Editores: Sedlacek B.; C.G. Overberger and H.P. Mark. "Degradation and Stabilization of Polyolefins". ED. John Wiley and Sons. 1977.
- 26.- Padilla A. and A. Sanchez. "Development of a New Composite - Material from Waste Polymer Natural Fiber and Mineral Filler" J. of Applied Polymer Science. Vol 29, 10, 1984.
- 27.- Sanchez A.; A. Padilla y A. Escamilla. "Correlación de Propiedades Mecánicas del Polietileno Reforzado y Degradación causada por Irradiación UV". Sociedad Polimérica de México, 86.
- 28.- Sanchez A., A. Padilla y A. Escamilla. "Condiciones de Producción del Polietileno Alta Densidad". Hidrocarbon Processing. Nov., 1975.
- 29.- Simonds R.H. y J.M. Churd. "Plástico: su Formulación y Moldeo". Compañía Editorial Continental S.A. 1964.
- 30.- PEMEX. "Polietileno: Propiedades y Aplicaciones y Métodos de Fabricación". 1984.
- 31.- Herman V. Boening. "Polyolefins". ED. Elsevier Publishing Company. Amsterdam, 1966.
- 32.- Jenkins A.D. "Progress in Polymer Science". ED. Pergamon Press.
- 33.- Potts J.E. "Continuous Pyrolysis of Plastic Wastes" Ind. Water Eng. Vol. 7, 8, Agosto, 1970.
- 34.- Samner W.S. and Ortuglio. "Conversion of Municipal and Industrial Refuse in to Useful Materials by Pyrolysis. Bureau Mines RI 7423, 1976.

- 35.- Silva L.G. y J.C. Dominguez. "III Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental". Acapulco Gro. Méx., 1982.
- 36.- Zepeda Porras P. "El relleno Sanitario Manual como Tecnología Apropiada". III Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental". Acapulco Gro. Méx., 1982.
- 37.- Yen T.P. "Recycling and Disposal of Solid Waste, Industrial, Agricultural and Domestic". Ann Arbor Science, USA 1975.
- 38.- Environmental Protection Agency Pub. "Air Classification of Solid Waste. USA, 1972.
- 39.- National Technical Information Service(NTIS). "Waste Management Program Technical Progress Report". USA, 1980.
- 40.- Raff R.A. and J.B. Allison. "Polyethylene". ED. INTERSCIENCE PUBLISHERS Inc. 1956.
- 41.- Billmeyer F.W. "Textbook of Polymer Science". ED Interscience Publisher Inc. London 1971.
- 42.- Whittington R. Lloyd. "Whittington's Dictionary of Plastics". ED. Technomic Publishing Co. Inc. USA, 1968.
- 43.- Carraher Ch.E. and Raymond B. Seymour. "Physical Aspects of Polymer Structure: A Dictionary of Terms". J. Chem. Educ. 63 (5), pag 418-419. 1986.
- 44.- Bellido V.J. "Macromoléculas". Cuaderno No. 2 de Instituto de Investigaciones en Materiales. UNAM, 1981.
- 45.- Shreder V.L.; Chalych A.E y Krivosher V.N. Plasty Massy. 1986 (6), 32-3. Chemical Abstracts 61661z, vol 105.
- 46.- Iguma Nobotuchi. Pyrolysis of Waste Plastics. Chemical Abstracts 137067h, vol 105.